

# FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF

## Jahresbericht

1998 und 1. Halbjahr 1999

Herausgeber: Vorstand  
Redaktion: Dr. Jürgen Leib  
FZR-266

---

Impressum:

Herausgeber: Forschungszentrum Rossendorf e. V.  
Postfach 5101 19  
01314 Dresden

Telefon: (0351) 260-0  
Telefax: (0351) 269-0461  
e-Mail: [kontakt@fz-rossendorf.de](mailto:kontakt@fz-rossendorf.de)  
Internet: <http://www.fz-rossendorf.de>

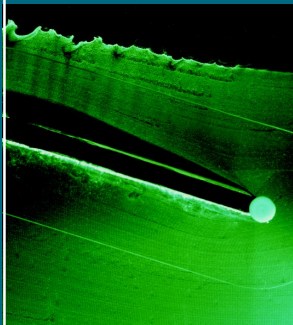
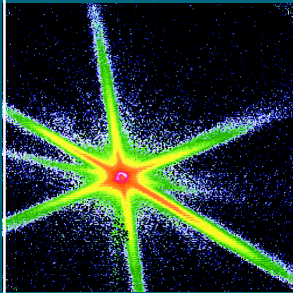
Schriftenreihe: Wissenschaftlich-Technische Berichte  
FZR-266  
November 1999  
ISSN 1437-322X

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

Gesamtherstellung: Initial Satz & Grafik Studio, Rossendorf

Als Manuscript gedruckt  
Alle Rechte beim Herausgeber

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



# EINLEITUNG

---

**Abbildungen Seite 3 von oben nach unten:**

Eingebettet in Laub- und Nadelwälder:  
Der Forschungsstandort Rossendorf aus der Vogelperspektive.

Zerstörungsfreie Materialanalyse mit Hilfe eines an Luft geführten Protonenstrahl. Die Abbildung zeigt die Untersuchung der Zusammensetzung von Böttger Steinzeug aus der „Porzellansammlung Dresden“.

Abbildung der Schädigung vor der Riss-Spitze eines biegeverformten Materials mit Hilfe der Mikrostrahl-Röntgenkleinwinkelstreuung. Die unterschiedlichen Farben geben die Intensitätsverteilung des gestreuten Röntgenstrahls wieder.

Ablösungsunterdrückung an einer schräg angeströmten Platte. Durch die elektromagnetische Strömungskontrolle auf der Unterseite der Platte bleibt die von rechts anliegende Strömung laminar. Ohne Lorentzkrafteintrag würde sie bereits an der rechten Vorderkante turbulent ablösen (vgl. auch Beitrag „Elektromagnetische Umströmungskontrolle in schwach-leitfähigen Flüssigkeiten“, insb. Abb. 12, S. 26).

Bestrahlungsplatz der Krebstherapie mit Ionenstrahlen an der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt mit dem Positronen-Emissions-Tomographen der vom FZR entwickelt wurde (s. Abb. 3, S. 57).  
Foto: Achim Zschau, GSI

# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>Vorwort</b> .....	7
<b>Ereignisse</b> .....	13
<b>Ergebnisse</b> .....	19
Elektromagnetische Umströmungskontrolle in schwach-leitfähigen Flüssigkeiten .....	21
Charakterisierung gestörter regionaler Hirnfunktionen mit Hilfe von PET .....	29
Bakterien in Uranabfallhalden und ihre Wechselwirkung mit Uran .....	36
Ionen-Nitrierung von Aluminiumwerkstoffen .....	42
Seltsame Kaonen, hadronische Materie und kosmische Phasenübergänge .....	47
Wissen schafft Fortschritt .....	56
<b>Daten und Fakten</b> .....	61
Organigramm .....	63
Organe und Gremien .....	64
Überblick 1998/1. Halbjahr 1999 .....	66
Übersicht über die Forschungsschwerpunkte und -vorhaben 1998/99 .....	67
Übersicht über die zentrumsübergreifende Zusammenarbeit 1998/99 .....	68
<b>Überblick über die Institute und die wissenschaftlich-technische Infrastruktur</b> .....	69
■ Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung .....	71
■ Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie .....	75
■ Institut für Radiochemie .....	79
■ Institut für Kern- und Hadronenphysik .....	84
■ Institut für Sicherheitsforschung .....	89
■ Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik .....	93
■ Zentralabteilung Neue Beschleuniger .....	96
■ Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung .....	98
■ Projektgruppe ESRF-Beam-Line .....	100
■ Projektgruppe ELBE-Quelle .....	102
■ Administrative und Technische Infrastruktur .....	104



# VORWORT

---

Das Forschungszentrum Rossendorf e. V. (FZR) wurde Ende 1991 auf dem Gelände des ehemaligen Zentralinstituts für Kernforschung der DDR gegründet und nahm am 1. Januar 1992 seine Arbeit auf. Seinem neu gewonnenen Profil folgend – **Materialforschung, Biomedizin-Chemie, Umwelt, Sicherheitsforschung, Kernphysik** – trägt die anwendungsorientierte Grundlagenforschung des FZR zur Lösung wichtiger Probleme unserer Zeit bei. Das Forschungszentrum ist Mitglied der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz (WGL) unter deren Dach 79 nationale Forschungseinrichtungen vereint sind und wird je zur Hälfte von der Bundesrepublik Deutschland und den Ländern getragen. Mit seinen rund 620 Mitarbeitern und einem Jahresetat von etwa 100 Mio. DM stellt das FZR die größte Einrichtung der WGL dar und ist zugleich auch die größte außeruniversitäre Forschungseinrichtung in den neuen Ländern.

Die wissenschaftliche Arbeit des FZR wird in fünf Instituten durchgeführt:

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

Sie werden hierbei unterstützt durch die Zentralabteilungen:

- Forschungs- und Informationstechnik
- Neue Beschleuniger

und die Projektgruppen:

- ESRF-Beam-Line
- ELBE-Quelle.

Die Profilierung und Entwicklung des Forschungszentrums orientiert sich an den Herausforderungen, die Wissenschaft und Gesellschaft an eine moderne Forschungseinrichtung stellen. Gegenwärtig stehen hierbei in Rossendorf spezielle Probleme der Medizin, der Ökologie, der Materialforschung und der Sicherheit des Menschen in seiner technischen Umwelt im Vordergrund. Daneben gibt es – aus der Rossendorfer Tradition gewachsen – weiterhin ein

Engagement auf dem Gebiet der Kernphysik. Besonders hier wird deutlich, was für alle Arbeiten am Forschungszentrum gilt: Erkenntnisse, Methoden und Technologie aus der Grundlagenforschung für die Anwendungen und die Forschung in anderen Fachbereichen zu erschließen. Die Institute arbeiten dabei sowohl nach eigenständigen wissenschaftlichen Programmen als auch an interdisziplinären Projekten, die nur instituts- und fachübergreifend zu realisieren sind. Unterstützt werden sie dabei von technischen und ingenieur-wissenschaftlichen Abteilungen, dem Rechenzentrum, der Bibliothek und der administrativen Infrastruktur.

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

Die radioökologischen Arbeiten des FZR stützen sich auf langjährige Erfahrungen in der Radiochemie. Die Untersuchung des Verhaltens von Radioaktivität tragenden Molekülen in ökologischen Systemen ist das Aufgabengebiet dieser Arbeitsrichtung. Hierzu bedient man sich moderner strahlungsphysikalischer, element- und strukturanalytischer Techniken, wie z. B. der Laserspektroskopie und der Synchrotronstrahlung, die für die Messung radioaktiver Proben ausgelegt sind.

Diese Forschungen liefern zum einen Beiträge zum Grundlagenverständnis und sind zum anderen von großer und bleibender Bedeutung für die Entwicklung effektiver Sanierungsstrategien für radioaktiv belastete Gebiete. Dabei

werden konventionelle Konzepte auf ihre Anwendbarkeit überprüft und erprobt, aber auch neuartige z. B. moderne mikrobiologische Verfahren erforscht und entwickelt. Für die in Sachsen und Thüringen anstehenden Sanierungsarbeiten des Uranbergbaus sind sie von hoher Aktualität.

Bei der **Materialforschung** stehen Arbeiten mit Ionenstrahlen für die Modifikation und Analyse von Festkörperoberflächen sowie Forschungen zur Materialsicherheit im Vordergrund. Das Ionenstrahlzentrum des FZR verfügt über eine umfangreiche Ausrüstung für ionenphysikalische Untersuchungen. Für die Ionen- und plasmagestützte Schichtabscheidung können Ionen einer Vielzahl von Elementen des Periodensystems in elektrischen Feldern von wenigen 10 Volt bis zu 10 Millionen Volt beschleunigt werden. Da auch modernste Methoden und Verfahren der Analyse- und Präparationstechnik zur Verfügung stehen, wird das Forschungszentrum mehr und mehr zu einem führenden nationalen und internationalen Ionenstrahlzentrum. Als sog. Large-Scale-Facility der Europäischen Union – „Center for Application of Ion Beams in Materials Research“ (AIM) – wird es im Rahmen des TMR-Programms besonders gefördert und steht dadurch Wissenschaftlern aus ganz Europa zur Nutzung offen. Auch ist das FZR Mitglied des Materialforschungsverbundes Dresden.

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

zentration der Arbeitsgebiete und der engeren Verflechtung mit den Arbeiten der anderen Institute Rechnung trägt. Von der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurde die Verlängerung des gemeinsam mit der TU Dresden betriebenen Innovationskollegs „Magnetohydrodynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten“ mit einer um rund 40% erhöhten Förderung bewilligt. Darüber hinaus konnten vom Institut das Labor für die Untersuchung bestrahlter Reaktorwerkstoffe sowie ein 1:5-Modell für Experimente zur Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Moderne **Kernphysik** beinhaltet die Untersuchung von Kernmaterie unter extremen Bedingungen und schließt die Physik der Hadronen im Kern ein. Die experimentellen Forschungen des FZR zu diesem Arbeitsgebiet werden an externen Beschleunigern z. B. der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt und des Forschungszentrum Jülich und bei der TU Darmstadt durchgeführt. Für die technische Realisierung der experimentellen Arbeiten steht ein Detektorlabor zur Verfügung. Kernphysikalisches Experimentieren in Rossendorf wird in Zukunft durch den Aufbau des ELBE-Elektronenbeschleunigers ermöglicht werden. Auch bei ihren kernphysikalischen Forschungsarbeiten beschränken sich die Wissenschaftler nicht auf den Erkenntnisgewinn durch die Grundlagenforschung, sondern suchen moderne Methoden und Technologie zur Lösung von Fragestellungen unserer Zeit zur Anwendung zu bringen. Eindrucksvoll demonstriert wurde dies z. B. bei der in Europa erstmals im Dezember 1997 bei der GSI in Darmstadt an einem Menschen durchgeführten Krebstherapie mit Ionenstrahlen. Durch den Einsatz der in Rossendorf entwickelten und gebauten Positronen-Emissions-Tomographie zur in-situ Kontrolle der Krebstherapie konnten wesentliche Beiträge zum Erfolg dieses neuartigen Tumortherapieverfahrens geleistet werden.

Das Forschungszentrum Rossendorf konzentriert sich verstärkt auf instituts- und disziplinübergreifende Vorhaben, die zunehmend zu einer Vernetzung der Institute und Abteilungen führen. Im Vordergrund stehen dabei zur Zeit insbesondere:

- Konstruktion, Aufbau und Überlegungen zur Nutzung der Strahlungsquelle ELBE, der angeschlossenen Freie-Elektronen-Laser für das Fernes Infrarot und der Photoneutronenquelle,



- Nutzung von Synchrotronstrahlung, vor allem für die Radioökologie und die Materialforschung,
- Einsatz der Positronen-Emissions-Tomographie in der Medizin und in der Strömungsmechanik,
- Einsatz radioaktiver Tracer in Bio- und Ökosystemen,
- Modellierung des Transports von Radionukliden.

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

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

Zu den wichtigsten Ergebnissen und Ereignissen des Jahres 1998 sowie des ersten Halbjahres 1999, auf die im folgenden Kapitel noch ausführlicher eingegangen wird, gehören für das Forschungszentrum Rossendorf die Grundsteinlegung für das Gebäude der „**Strahlungsquelle ELBE**“ am 20. Juli 1998.

Aus diesem Anlass haben der sächsische Ministerpräsident Prof. Kurt Biedenkopf sowie der Bundesstaatssekretär Dr. Fritz Schaumann Grußworte an die Teilnehmer gerichtet, unter denen sich auch der sächsische Staatsminister Prof. Hans Joachim Meyer befand. Der Bau ist inzwischen weit vorangeschritten; die Übergabe an das FZR wird Ende 1999 erfolgen.

Die „Strahlungsquelle ELBE“ stellt derzeit das größte Zukunftsprojekt des Forschungszentrums dar. Das Herzstück dieses Forschungsgrößgerätes besteht aus einem supraleitenden Linearbeschleuniger, der einen kontinuierlichen Elektronenstrahl hoher Brillanz mit einer Energie von 40 MeV und einem Strom von 1 mA bei geringer Emittanz liefern wird. Vorarbeiten und Experimente, wie der Bau und Test von Elektroneninjektoren und der supraleitenden Beschleunigerstrukturen begleiten die Planungs- und Bauphase. Der erzeugte Elektronenstrahl wird neben den grundlegenden Untersuchungen zur Strahlungsphysik, zur Erzeugung von

intensiver Röntgenstrahlung sowie die Erzeugung von Neutronen mit Hilfe eines Spallations-targets und später evtl. auch von Positronen verwendet werden. Das Neutronenlabor wird von der TU Dresden betrieben, die als enger Partner für dieses Teilprojekt auftritt. Vornehmlich aber wird die Erzeugung von intensivem Infrarot-Licht mittels Freie-Elektronen-Laser (FEL) im Vordergrund stehen. Das mit den FEL erzeugte intensive, quasi-kontinuierliche, in einem Wellenlängenbereich von 5 bis 150 Mikrometer durchstimmbare Infrarot-Licht erschließt einen besonders für Materialforschung und Biomedizin sehr interessanten, bisher schwer zugänglichen Spektralbereich für die Spektroskopie, der besonders auf dem Gebiet der Halbleitermaterialien von Bedeutung ist. Der Freie-Elektronen-Laser wird dabei auch externen Nutzern aus Deutschland und Europa zur Verfügung stehen. Die Aufbauarbeiten zur Strahlungsquelle-ELBE werden im FZR vorrangig in den Zentralabteilungen Forschungs- und Informationstechnik sowie Neue Beschleuniger und im Institut für Kern- und Hadronenphysik durchgeführt, unterstützt durch Kooperationen vor allem mit der Stanford Universität, DESY Hamburg und der TH Darmstadt.

Einen weiteren großen Schritt für das FZR stellt der voranschreitende Ausbau des **Ionenstrahlzentrums** dar. Im fertiggestellten Gebäudeanbau konnten mehrere Beschleuniger- und Analyseeinrichtungen für die Materialforschung kombiniert werden. Die Arbeiten des Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung und die Bedeutung seiner hervorragenden Einrichtungen zur Modifikation und Analyse von Oberflächen mit Hilfe von Ionenstrahlen auch für externe Nutzer wurden von der Europäischen Union dadurch gewürdigt, dass die Einrichtungen als „**Center for Application of Ion Beams in Materials Research (AIM)**“ – als erstes Forschungsgrößgerät Sachsens im Oktober 1998 – in die Liste der europäischen Large Scale Facilities im Rahmen des TMR-Programms aufgenommen wurden und in diesem Zusammenhang Fördermittel zur Finanzierung von Reisen und Nutzerkosten von Gästen zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus ist das Institut Mitglied eines Forschungsverbundes Dresden/Chemnitz, der mit seinem Vorschlag für ein Kompetenzzentrum „Ultradünne Funktionale Schichten“ als einer der sechs Sieger aus einem bundesweiten Wettbewerb des BMBF um die Einrichtung von Nanotechnologie-Kompetenzzentren hervorgegangen ist.

Das Institut ist ebenfalls am überregionalen Kompetenzzentrum „Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung“ beteiligt. Das Rossendorfer Ionenstrahlzentrum konnte so, der Empfehlung des Wissenschaftsrates folgend, seine Stellung als nationales Ionenstrahlzentrum von internationalem Rang weiter festigen.

Auch bei den anderen größeren Projekten des FZR konnten bedeutende Fortschritte erzielt werden. So wurde das **Strahlrohr ROBL**, die **Rossendorfer Beamline** an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle (ESRF) in Grenoble, am 8. Juni 1998 in Gegenwart ihres Generaldirektors, Herrn Prof. Yves Petroff, sowie weiterer hochrangiger Vertreter dieser führenden europäischen Einrichtung in Betrieb genommen. Der eigene Experimentierplatz an der leistungsfähigsten Synchrotronstrahlungsquelle der Welt eröffnet den Wissenschaftlern den Einsatz von Synchrotronstrahlung in der Materialforschung an Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen. Besonders hervorzuheben ist dabei, dass die Rossendorfer Einrichtung in einer weltweit einzigartigen Weise die modernen Methoden der Spektroskopie mit Synchrotronstrahlung auch für die Untersuchung radioaktiver Proben erschließt.

Inzwischen wurden am Strahlrohr ROBL hochauflösende spektroskopische Untersuchungen für die Radioökologie sowie die Materialforschung mit großem Erfolg begonnen. ROBL wurde bereits im Sommer 1999 ebenfalls in die Liste der „Large Scale Facilities“ der Europäischen Union aufgenommen. Dies ermöglicht es der Vielzahl externer Gruppen, die an der Nutzung sowohl des Radiochemie- und als auch des Materialforschungsmessplatzes an ROBL interessiert sind, an diesem Forschungsgerät des FZR im Grenoble zu arbeiten.

Im gemeinsam mit dem Klinikum der TU Dresden betriebenen **PET-Zentrum** des FZR konnten im Jahr 1998 insgesamt 442 Patienten untersucht werden. Im Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie steht daneben weiterhin die Entwicklung von Radiotracern für die Radiopharmazie und Nuklearmedizin im Vordergrund; für zwei weitere Radiopharmaka wurde die Herstellungserlaubnis erhalten.

Im Jahre 1998 konnte der moderne Labor-Neubau für die Radiochemie in Betrieb genommen werden. Das Institut für Radiochemie hat mit diesem Neubau und seinen technischen Ein-

richtungen für den Umgang mit höheren Transuranen, seinem Synchrotron-spektroskopie-Messplatz am Strahlrohr ROBL in Grenoble sowie der Einführung molekularbiologischer Arbeiten für die Radioökologie weltweit herausragende Einrichtungen und Arbeitsmöglichkeiten aufzuweisen.

Die Arbeiten im Institut für Kern- und Hadronenphysik konzentrieren sich zunehmend auf Arbeiten zur Errichtung der Strahlungsquelle ELBE, zu den Freie-Elektronen-Lasern für das Fern Infrarot sowie auf Experimente zur Strahlungs- und Kernphysik an ELBE. Das Institut für Kern- und Hadronenphysik konnte im Jahr 1999 ein renoviertes Gebäude in der Nähe der Strahlungsquelle ELBE beziehen. Damit ist das Institut im Wesentlichen „unter einem Dach“ untergebracht. Außerordentlich erfolgreich verliefen, wie bereits kurz erwähnt, die Beiträge des Instituts zum Aufbau und ersten Einsatz der neuen Krebstherapie mit Kohlenstoff-Ionen. Bei diesem Gemeinschaftsprojekt der Radiologischen Universitätsklinik Heidelberg, der Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt (GSI), des Deutschen Krebsforschungszentrums Heidelberg und des Forschungszentrums Rossendorf am Schwerionensynchrotron der GSI wurde 1998 der klinische Betrieb aufgenommen und seitdem 42 Patienten mit inoperablen Tumoren im Hirn- und Schädelbasisbereich behandelt. An der Anlage sind eine Vielzahl erstmalig eingesetzter wissenschaftlicher und technischer Innovationen realisiert worden. Dazu gehört insbesondere auch die Online-Kontrolle des Therapiestrahls über die Methode der in Rossendorf entwickelten Positronen-Emissions-Tomographie.

Die erfolgreiche Arbeit des Forschungszentrums Rossendorf spiegelt sich auch in den positiven Bewertungsberichten des Wissenschaftlichen Beirats des FZR wieder. Im Berichtszeitraum hat der Beirat die Bewertungsberichte zu allen fünf Instituten verabschiedet.

Das Forschungszentrum Rossendorf richtete auch 1998 viele nationale und internationale Workshops und Konferenzen aus; darunter befanden sich die Tagung der Fachgruppe Nuklearchemie der GdCh sowie die 14. Internationale Konferenz „Ion Beam Analysis“, veranstaltet gemeinsam mit der 6. Europäischen Konferenz „Accelerators in Applied Research and Technology“, mit etwa 400 Teilnehmern.

Unter den 1750 Gästen, die das FZR im Berichtszeitraum besuchten, befanden sich Ministerpräsident Prof. Kurt Biedenkopf und Staatsminister Prof. Hans Joachim Meyer, die Staatssekretäre Dr. Fritz Schaumann, Dr. Uwe Thomas und Eckhard Noack, die MdB Stephan Hilsberg und Ulrich Kasparick, der Dresdner Oberbürgermeister Dr. Herbert Wagner sowie der Vorsitzende des Ausschusses Blaue Liste des Wissenschaftsrates Prof. Dietrich Wegener.

Aus dem Personalbereich ist die Wiederbestellung der Institutsdirektoren Professoren Bernd Johannsen, Wolfhard Möller und Frank-Peter Weiß für die nächste 5-Jahres-Periode 1998 bis 2003 zu nennen. Herr Prof. Heino Nitsche hingegen ist als Direktor des Instituts für Radiochemie zum 31. Oktober 1998 aus dem FZR ausgeschieden, um das ehrenvolle Angebot einer Professur an der University of California, Berkeley sowie gleichzeitig als Institutsdirektor am Lawrence Berkeley National Laboratory anzunehmen. Seine Stelle als Direktor des Instituts für Radiochemie des FZR wurde im Jahre 1998 ausgeschrieben. Die Wiederbesetzung der Direktorenstelle soll bis Ende 1999 erfolgen.

Im Jahr 1998 konnte auch die Berufungsliste zur Besetzung der Stelle eines weiteren Direktors am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung zur Einführung und Verstärkung des Arbeitsgebietes „Spektroskopie in der Halbleiterphysik“ verabschiedet werden. Die Verhandlungen zur Besetzung dieser Stelle sind inzwischen weit fortgeschritten.

Die Stelle des Abteilungsleiters Positronen-Emissions-Tomographie, verbunden mit einer C3-Professur am Klinikum der TU Dresden, konnte mit Herrn Prof. Wolfgang Burchert im August 1998 besetzt werden. Leider hat Herr Prof. Wolfgang Burchert auf Grund eines sehr attraktiven externen Angebots das FZR bereits im Frühjahr 1999 wieder verlassen.

Das FZR verfügte am 30. Juni 1999 über 420 Planstellen, ergänzt durch 111 Drittmittel-Stellen. Zusätzlich werden 42 Doktoranden und 21 Postdoktoranden aus Annex- und Drittmitteln beschäftigt. Im Berichtszeitraum wur-

den 19 Doktorarbeiten abgeschlossen. Außerdem werden insgesamt 24 Azubis in sieben Berufen ausgebildet.

Eine erfreuliche Entwicklung zeigen auch die zusätzlich eingeworbenen Projektmittel. Allerdings konnten bei der Steigerung der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft eingeworbenen Mittel die an die DFG abzugebenden 2,5 % noch nicht in vollem Umfang wieder wettgemacht werden. Zusätzlich zu den jährlichen Zuwendungen von derzeit ca. 86 Mio. DM zur Grundfinanzierung, konnte das FZR Drittmittel aus nationalen und europäischen Förderprogrammen sowie über Forschungsverträge und Industriekooperationen von jährlich ca. 13 Mio. DM einwerben.

Der Projektträger Energie und Umwelt am Forschungszentrum Rossendorf bewilligte im Auftrag des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung im Berichtszeitraum über 5000 Anträge im Rahmen des Immissionsschutzprogramms mit einem Fördermittelvolumen von 40 Mio. DM. Seit Frühjahr 1999 ist der Projektträger als Landeskoordinator für die bundesweite Motivationskampagne „Solar - na klar!“ und als unabhängige Prüfeinrichtung bei der Bereitstellung regenerativ erzeugten Stroms in Sachsen tätig.

Mit der hoch angesehenen Karls-Universität Prag und der Tschechischen Akademie der Wissenschaften wurde ein Kooperationsvertrag abgeschlossen.

Im Folgenden werden, neben einem Überblick über wichtige Ereignisse im Berichtszeitraum, ausgewählte Beispiele der wissenschaftlichen Arbeiten des FZR vorgestellt. Auf die wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und Vorhaben der einzelnen Institute und Zentralabteilungen wird im zweiten Teil dieses Jahresberichtes näher eingegangen. Über den vorliegenden zentrumsumfassenden Jahresbericht hinaus geben die Institute wissenschaftlich detaillierte Jahresberichte in englischer Sprache heraus, die bei den jeweiligen Instituten und Abteilungen angefordert werden können. Aktuelle und weiterführende Informationen zur interdisziplinären, anwendungsorientierten Grundlagenforschung des Forschungszentrum Rossendorf finden Sie zudem auf den Internetseiten des FZR ([www.fz-rossendorf.de](http://www.fz-rossendorf.de)).

*Frank Pobell*  
Wissenschaftlicher Direktor

*Gerd Parniewski*  
Kaufmännischer Direktor

---

**Abbildungen Seite 13 von oben nach unten:**

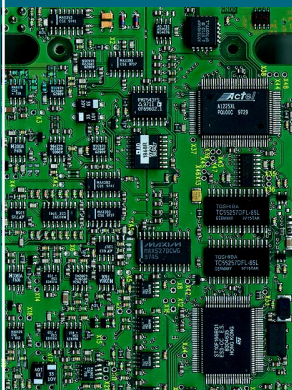
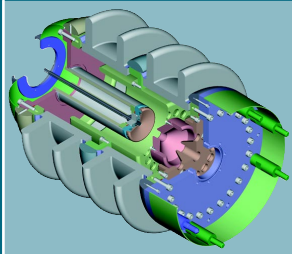
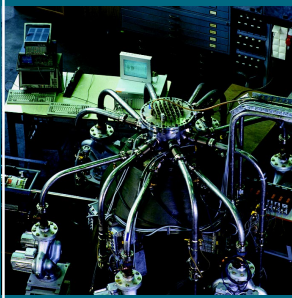
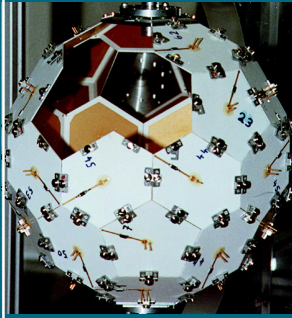
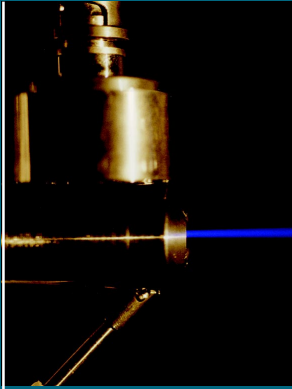
4 MeV Protonenstrahl an Luft  
(Tandembeschleuniger Rossendorf)

Modell des Rossendorfer Silizium Balls (RoSiB) – dieser Detektor für Kernstruktur-Experimente wurde in Rossendorf als Beitrag zur europäischen EUROBALL-Kooperation gebaut.

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

Schematische Darstellung eines der Elektronen-Injektoren die für die Strahlungsquelle ELBE entwickelt wurden, um Elektronenbündel mit hoher Stromdichte zu erzeugen.

Eine Leiterplatte für den tragbaren 4k-Multi-Channel-Analyser (MCA 166) für Sicherheitsinspektionen/Strahlenschutz, entwickelt im Forschungszentrum Rossendorf, gefertigt von der Firma GBS Elektronik GmbH. (s. S. 59)



# EREIGNISSE

# AUSGEZEICHNETE ARBEITEN -

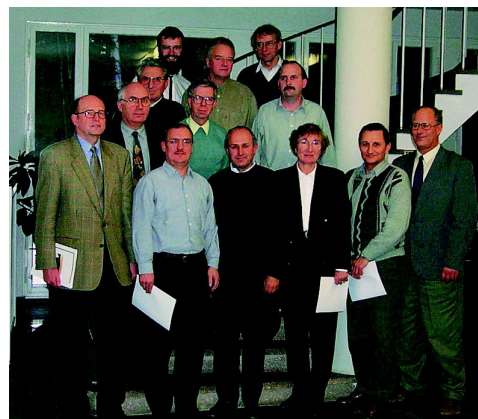
## Die Preisträger des Forschungszentrums Rossendorf 1998

### Laureaten des Technologie- des Forschungs- sowie des Doktorandenpreises (v.l.n.r.):

Dr. Andreas Wolf, Dipl.-Ing.  
Roland Jainsch, Dr. Wolfgang  
Enghardt, Dipl.-Ing. Kathrin  
Lauckner, Dipl.-Ing. Rainer  
Hinz, Dipl.-Ing. Manfred So-  
biella, Dr. André Peshier

### Preisträger des interdisziplinären, zentrumsübergreifenden Projekts (v.l.n.r.):

Dr. Wolfgang Matz, Dr. Winfried Oehme,  
Dipl.-Ing. Siegfried Dienel,  
Dipl.-Ing. Gudrun Hüttig, Dipl.-  
Ing. Wolfgang Neumann, Dr.  
Hans Krug;  
(zweite Reihe) Prof. Gert Bern-  
hard, Dr. Frank Eichhorn, Dipl.-  
Ing. Jürgen Claußner; (dahinter)  
Dr. Manfred Betzl, Dr. Vincent  
Brendler, Dipl.-Ing. Peter Rei-  
chel, Dr. Friedrich Prokert



Als einen wichtigen und besonderen Tag – einen Festtag – im Leben des FZR bezeichnete der Wissenschaftliche Direktor, Prof. Frank Pobell, den Tag der Preisverleihung. Als Zeichen der Anerkennung und Würdigung der erfolgreichen Arbeit im abgelaufenen Jahr werden einzelne Mitarbeiter oder Arbeitsgruppen für besonders hervorragende wissenschaftliche und technische Arbeiten mit den bis zu 3000 DM dotierten Forschungs-, Technologie- oder Doktorandenpreis des FZR ausgezeichnet.

### Doktorandenpreis des FZR 1998

#### Dr. Peshier

(Institut für Kern- und Hadronenphysik)

für seine Arbeit zur Zustandsgleichung heißer stark wechselwirkender Materie – konsistente Beschreibung stark gekoppelter Quantensysteme

weiterhin wurden ausgezeichnet:

#### Dr. Reisgys

(Inst. für Bioanorg. u. Radiopharmaz. Chemie)

Rhenium- und Technetiumkomplexe mit Thioetherliganden

#### Dr. Albe

(Inst. für Ionenstrahlphysik u. Materialforsch.)

Computersimulation zu Struktur und Wachstum von Bornitrid

### Forschungspreis des FZR 1998

#### Dr. Enghardt, Dr. Hasch, Dipl.-Ing. Hinz, Dipl.-Ing. Lauckner, Dr. Pawelke, Dipl.-Ing. Sobiella

(Institut für Kern- und Hadronenphysik)

für die Entwicklung und den Aufbau der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) in der Schwerionen-Tumorthherapie

### Technologiepreis des FZR 1998

#### Dipl.-Ing. Jainsch, Dr. Pröhl, Dr. Wolf

(ZA Forschungs- und Informationstechnik)

für die marktreife Entwicklung des MCA 166 – ein kernspektroskopischer Vielkanalanalysator für Inspektionsaufgaben von Kernspaltmaterialien

### Preis für die erfolgreiche interdisziplinäre Durchführung eines zentrumsübergreifenden Projektes

#### Dr. Matz, Dr. Prokert, Dr. Betzl, Dr. Eichhorn, Dipl.-Ing. Reichel, Prof. Bernhard, Dr. Brendler, Dr. Reich, Dipl.-Ing. Hüttig, Dipl.-Ing. Schlenk, Dr. Pröhl, Dipl.-Ing. Claußner, Dipl.-Ing. Dienel, Dr. Oehme, Dr. Krug, Dipl.-Ing. Neumann, Dr. Schell, Dr. Funke, U. Strauch

für den Aufbau einer Synchrotronstrahlungs-Beamline für Radiochemie und Materialforschung an der ESRF Grenoble (ROBL)

---

## LEHRERFORTBILDUNG



Das Forschungszentrum veranstaltete am 27. August 1998 erstmals eine überregionale Lehrerfortbildung mit dem Thema „Moderne kernphysikalische Methoden in der Medizin“ an der mehr als einhundert Gymnasiallehrer aus Sachsen teilnahmen. Der große Erfolg dieser in Zusammenarbeit mit den Schulämtern angebotenen Veranstaltung des FZR konnte auch 1999 mit dem Thema „Teilchenbeschleuniger in der modernen Forschung“ fortgesetzt werden.

---

## TAG DER OFFENEN TÜR

Großes Interesse weckten in der Bevölkerung und besonders bei Schülern der „Tag der offenen Tür“, der 1998 und auch 1999 im FZR veranstaltet wurde (im Bild: Besichtigung des PET-Zyklotrons für die Erzeugung von Radionukliden für die medizinische Diagnostik). Neben der Faszination von Forschung und Technik wurden bei diesen Veranstaltungen insbesondere die hervorragenden Chancen und Perspektiven herausgestellt, die eine wissenschaftlich-technische Ausbildung oder ein naturwissenschaftliches Studium bieten. So konnten sich Schüler und Studenten aus erster Hand bei der Studienberatung der TU Dresden, beim Hochschulteam des Arbeitsamtes Dresden sowie bei der Dresdner Existenzgründer Initiative „Dresden Exists“



oder auch über Praktikums- und Ausbildungsplätze des FZR an Ort und Stelle informieren.

---

## HANNOVER MESSE INDUSTRIE 1999



Auf der Hannover Messe Industrie 1999 präsentierte sich das Forschungszentrum Rosendorf als Partner des Innovationszentrums „Ingenieur-Werkstoffe“ sowie erstmals mit einem eigenen Stand im Bereich „Forschung und Technologie“. Hier stießen die anwendungsorientierten Forschungsergebnisse des FZR auf großes Interesse – wie z. B. das „Blaue Leuchten in Silizium“ beobachtet vom Staatssekretär im Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, Eckhard Noack – und verdeutlichten die Stellung des Forschungszentrums als größte außeruniversitäre Forschungseinrichtung der neuen Länder.

## PREMIERE '99

Thoralf Gebel vom FZR und zwei weitere Unternehmer in spe hatten in der ersten Phase des Sächsischen Gründerwettbewerbs PREMIERE '99 die besten Geschäftsideen. Dafür überreichte ihnen der Sächsische Wirtschaftsminister Dr. Kajo Schommer am 27. April 99 in Dresden eine symbolische Prämie von 1000 DM. Schommer sagte: „Mit dieser ersten Prämierung wollen wir ähnlich der Vergabe der Trikots bei der Tour de France die ganze Mannschaft anspornen, den Spitzenreitern auf den Fersen zu bleiben.“

Der Rossendorfer Preisträger ist Mitarbeiter am Institut für Ionenstrahlphysik und arbeitet dort an seiner Doktorarbeit. Honoriert wurde seine Geschäftsidee, Verfahren zur plasma-gestützten Herstellung sehr dünner Schichten für die Mikroelektronik zu entwickeln.

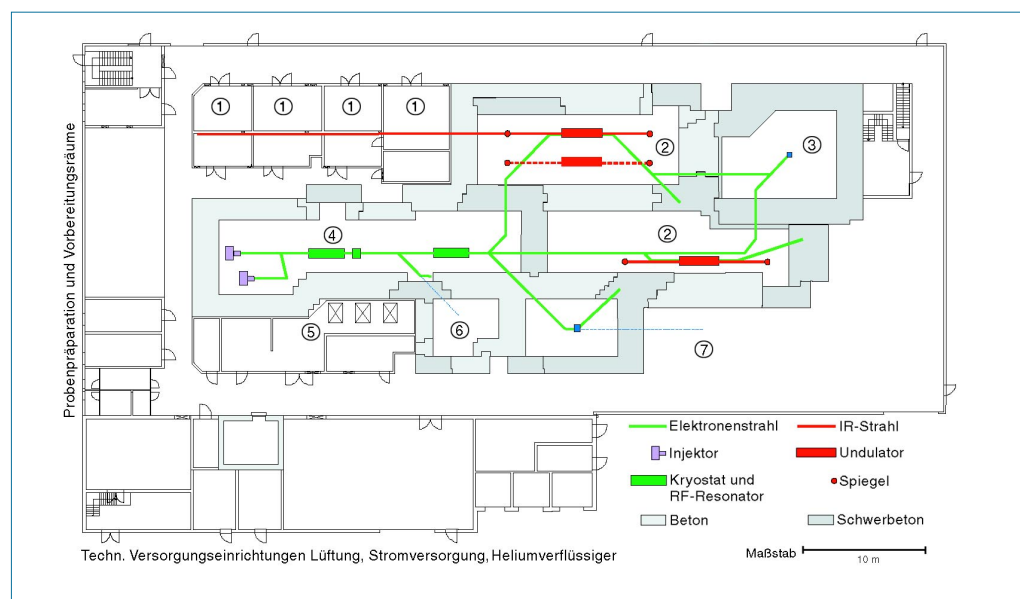


Die Preisträger.  
Von links: Dr. Gerd Lippold (Leipzig), Wirtschaftsminister Dr. Kajo Schommer, Martin Teucher (Dresden), Thoralf Gebel.

## STRAHLUNGSQUELLE ELBE

Der Aufbau der Strahlungsquelle ELBE, eines supraleitenden 40 MeV-Linearbeschleunigers für Elektronen mit hoher Brillanz und geringer Emittanz zur Erzeugung verschiedenster Arten von Strahlung – Elektronen, Neutronen, Positronen, Röntgen- und vor allem Infrarotlicht – ist gegenwärtig das größte Forschungsprojekt des FZR. Insbesondere die Erzeugung von intensivem Infrarotlicht im Wellenlängenbereich von 5 bis 150  $\mu\text{m}$  mit Freie-Elektronen-Lasern (FEL) wird ELBE zu einem einzigartigen Forschungsgerät machen, dessen vielseitige Nutzung bereits in der Aufbauphase auf begleitenden Nutzertreffen mit einer Vielzahl internationaler Forschergruppen mit großem gegenseitigen Interesse diskutiert wird.

- ① FEL-Labors / IR-Experimente
- ② FEL-Halle
- ③ Neutronenlabor
- ④ Beschleunigerhalle
- ⑤ Hochfrequenzgeneratoren
- ⑥ Experimente mit Bremsstrahlung
- ⑦ Experimente mit Röntgenlicht resp. Positronen





Einen Schwerpunkt für die Nutzung der FEL's, neben den vorgeschlagenen Infrarotuntersuchungen zu biomedizinischen und biochemischen Fragestellungen sowie in der Radiochemie, wird die Halbleiterspektroskopie darstellen. Für diese Messungen wird insbesondere die hohe Intensität sowie die Durchstimmbarkeit des Infrarotlichts über einen weiten Wellenlängenbereich von großem Vorteil sein. Eine wichtige Rolle wird dabei die Durchführung von sog. „pump-probe“ Experimenten spielen, bei denen mit einem Puls angeregt und einem zeitverzögerten zweiten Puls abgetastet wird. Im einfachsten Fall geschieht dies mit Strahlung der selben Wellenlänge. Mehr Information kann durch ein Zwei-Farb-Experiment gewonnen werden. Darüber hinaus wird die Erzeugung und Nutzung schneller Neutronen, realisiert in enger Zusammenarbeit mit der TU Dresden, sowie von quasi-monochromatischer Röntgenstrahlung und von Bremsstrahlung ein breites Anwendungsfeld für die unterschiedlichsten Disziplinen der anwendungsorientierten Grundlagenforschung erschließen.

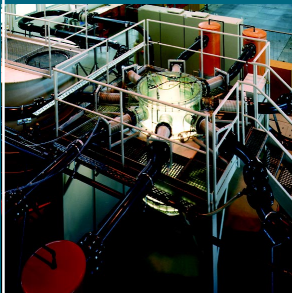
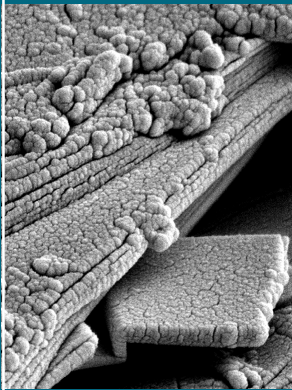
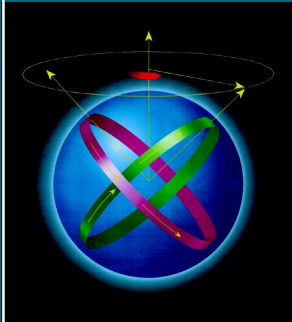
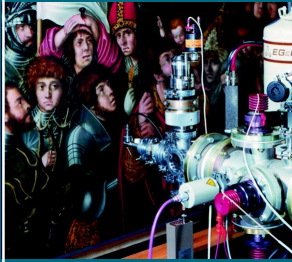


Bei der Grundsteinlegung am 20. Juli 1998 durch den Projektleiter, Dr. Frank Gabriel und den Vorstand des FZR, Prof. Frank Pobell und Herrn Gerd Parniewski (Bild links) richteten der sächsische Ministerpräsident Prof. Kurt Biedenkopf und der Bundesstaatssekretär Dr. Fritz Schauermann Grußworte an die Teilnehmer, unter ihnen der sächsische Staatsminister für Wissenschaft und Kunst, Prof. Hans Joachim Meyer (Bild rechts).



Bereits am 16. September 1998 konnte Richtfest gefeiert werden (Bild links). Nach Fertigstellung des Innenausbaus (hier im Bild die Infrarot-Labors im Vordergrund sowie die Strahlenschutzwände für den Beschleuniger im Hintergrund), der auch die Inbetriebnahme der aufwendigen Infrastruktur, wie die Kälteanlage zum Betrieb der supraleitenden Beschleunigerstrukturen bei einer Temperatur von 1,8 Kelvin und den Reinraum für die Montage der Einzelteile einschließt, wird zunächst der bereits in Form eines Teststandes aufgebaute gepulste Injektor für den Elektronenbeschleuniger in das Gebäude umgesetzt werden. Danach erfolgt der schrittweise Aufbau und die Inbetriebnahme des Beschleunigers und der Freie-Elektronen-Laser in mehreren Ausbaustufen.





ERGEBNISSE

---

**Abbildungen Seite 19 von oben nach unten:**

1 : 5 Modell für Experimente zur Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren:  
Plexiglasmodell des Reaktorbehälters

Zerstörungsfreie Materialanalyse mit Hilfe eines an Luft geführten Protonenstrahls.  
Die Abbildung zeigt die Untersuchung der Farbzusammensetzung am Gemälde  
„Die 14 Nothelfer“ von Lucas Cranach dem Älteren, Kunstsammlung Dresden.

Magnetische Rotation eines Atomkerns – eine neue fundamentale Mode der Kern-  
rotation deren Konzept von Rossendorfer Kernphysikern entwickelt wurde.  
Abbildung mit freundlicher Genehmigung der „Physics World“.

Sorption von Huminsäure an eine Muskovit-Oberfläche.  
(Institut für Radiochemie)

1 : 5 Modell für Experimente zur Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren:  
Ausschnitt aus der Gesamtanlage mit Reaktorbehälter, Kühlwasserleitungen und  
Umwälzpumpen.

# ELEKTROMAGNETISCHE UMSTRÖMUNGSKONTROLLE IN SCHWACH-LEITFÄHIGEN FLÜSSIGKEITEN

G. Mutschke, U. Fey, T. Weier, V. Avilov, G. Gerbeth

Institut für Sicherheitsforschung

Die Magnetohydrodynamik (MHD) an der Schnittstelle zwischen gewöhnlicher Fluidmechanik und Elektrodynamik [1] beschreibt das Wechselspiel zwischen Strömungen elektrisch leitfähiger Fluide und elektromagnetischen Feldern. Das von der MHD umspannte Wissenschaftsgebiet ist ausgesprochen vielfältig und reicht von der Beschreibung großskaliger, astronomischer Vorgänge (Plasmen, Sternentstehung, Dynamoeffekt, Erdmagnetfeld) bis hin zu Vorgängen im Labormaßstab mit charakteristischen Längen von Metern (z. B. Metallurgie, Kristallzüchtung, Elektrochemie).

Die Wirkung der elektromagnetischen Felder auf die Strömung eines elektrisch leitfähigen Fluides wird durch die Lorentzkraft  $\mathbf{f}_L$  beschrieben, welche sich aus dem Kreuzprodukt von elektrischer Stromdichte  $\mathbf{j}$  und magnetischer Induktion  $\mathbf{B}$  ergibt und die als Volumenkraft die Strömungskontrolle ermöglicht:  $\mathbf{f}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ .

Hierbei muss zwischen Fluiden relativ großer elektrischer Leitfähigkeit wie Metall- oder Halbleiterschmelzen ( $\sigma \sim 10^6$  S/m) und schwachleitfähigen Fluiden wie Elektrolyten oder Meerwasser ( $\sigma \sim 1$  S/m) unterschieden werden. Nach dem Ohmschen Gesetz in bewegten Medien ist die Stromdichte  $\mathbf{j}$ , die durch ein elektrisches Feld  $\mathbf{E}$  und durch die Strömung der Flüssigkeit in einem Magnetfeld  $\mathbf{B}$  erzeugt wird, proportional zur elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$ :  $\mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$ . Im Gegensatz zu Metallschmelzen reicht die alleinige Anwendung magnetischer Felder in schwachleitfähigen Fluiden nicht aus, da die über das Kreuzprodukt von Strömungsgeschwindigkeit und Magnetfeld induzierten Ströme zu gering sind. Hier müssen dann zusätzlich äußere Ströme eingebracht werden, um eine ausreichende Kontrollwirkung zu erzielen. Dabei ist die großvolumige Anwendung elektromagnetischer Kräfte aufgrund Ohmscher Dissipation mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Die gezielte Beeinflussung lediglich des *körpernahen* Strömungsfeldes (Grenzschicht) erlaubt jedoch eine Umströmungskontrolle mit wesentlich geringerem Energieaufwand.

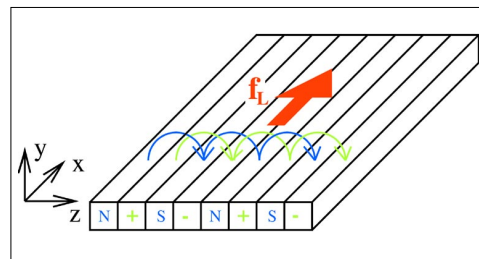
Erste Arbeiten zur elektromagnetischen Grenzschichtkontrolle erfolgten bereits in den 60er Jahren in Riga [3, 4]. In den letzten Jahren erfuhr die elektromagnetische Grenzschichtkontrolle jedoch weltweit, insbesondere in den USA und Korea, einen starken Aufschwung [2]. Dieser wurde einerseits getrieben durch moderne Entwicklungen in der Materialforschung, welche erhebliche Steigerungen der Stärke von Permanentmagneten ermöglichten. Heutige Magnetmaterialien aus NdFeB weisen Remanenzen von einem Tesla bei sehr hohen Koerzitivfeldstärken auf, womit vergleichbare Lorentzkräfte mit wesentlich geringerem elektrischem Energieaufwand erzeugt werden können. Damit einhergehend wuchs auch im Schiffbau das Interesse an dieser Kontrollmethode. Hier stand zunächst die mögliche Verminderung des Reibungswiderstandes bei Schiffsumströmungen im Vordergrund. Dieses Problem ist wie viele andere technisch relevante Strömungsvorgänge mit der Turbulenz verknüpft. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten oder großen charakteristischen Längen erfolgt der Umschlag von einer laminaren in eine turbulente Grenzschicht. Die Frage der Kontrolle turbulenter Grenzschichten ist, bedingt durch die Nichtlinearität der die Strömungsvorgänge beschreibenden Navier-Stokes Gleichung und die Vielzahl von involvierten Freiheitsgraden, außerordentlich komplex. Deshalb ist eine einfache Lösung des inversen Problems (welche Lorentzkraftverteilung minimiert die Wandreibung) im allgemeinen nicht bekannt. Viele Ansätze der Turbulenzkontrolle beziehen sich deshalb zunächst auf die gezielte Beeinflussung großskaliger Grenzschichtstrukturen. Beispiele hierfür sind Riblets oder oszillierende Querkräfte an Wänden, welche die Wechselwirkung großer, in Strömungsrichtung orientierter Wirbelstrukturen mit der Wand vermindern. Die mittels elektromagnetischer Methoden erzielte Verringerung der Wandreibung ist bisher jedoch in allen Fällen mit einer negativen energetischen Gesamtbilanz verbunden, d. h. der energetische Aufwand bei der elektromagnetischen Strömungskontrolle übersteigt die auf

Grund der Reibungsverminderung erzielten Einsparungen. Doch zeichnet sich ab, dass es eine Vielzahl von interessanten Anwendungen im Schiffsbau gibt, wo die elektromagnetische Strömungskontrolle vorteilhaft eingesetzt werden kann. Beispiele hierfür wären die Verbesserung der Zustromqualität bei Schiffspromellern (Verringerung von Kavitation, Verbesserung des Antriebes) sowie die Ablösungsverzögerung und Auftriebserhöhung an Ruderprofilen. Hierbei werden die elektromagnetischen Kräfte nur lokal angewandt und die energetischen Aufwendungen sind im Rahmen der Gesamtbilanz eines Schiffes meist vernachlässigbar. Natürlich muss sich die Effizienz der elektromagnetischen Grenzschichtkontrolle an den mit herkömmlichen Kontrollmethoden (z. B. Absaugen oder Einblasen) erreichten Ergebnissen messen lassen. Jedoch besitzt die elektromagnetische Methode eine Reihe von Vorzügen. Insbesondere kann die Kraft zeitlich und örtlich durch die Steuerung des gespeisten Stromes in einfacher Weise variiert werden. Damit ist eine kontaktlose und trägheitsfreie Steuerung mit einem hinsichtlich der Zielstellung optimierbaren Zeitverhalten bis hin zu hohen Frequenzen möglich.

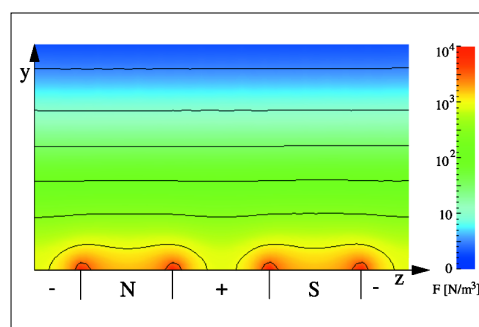
Der Bericht gibt einen Überblick über die im Rahmen eines gemeinsamen Projektes zur elektromagnetischen Umströmungskontrolle in Salzwasser in der Abteilung Magnetohydrodynamik durchgeführten Arbeiten. Beteiligt sind die Hamburgische Schiffbauversuchsanstalt (HSVA) und verschiedene Industriepartner aus dem Schiffbau. Neben einigen grundlegenden Überlegungen zur Lorentzkraft und zu charakteristischen Strömungsgrößen werden numerische und experimentelle Ergebnisse zu typischen Anwendungen vorgestellt. Diese konzentrieren sich auf die Kontrolle der Wirbelablösung hinter einem Kreiszyylinder, die Untersuchung der Grenzschicht einer Plattenströmung sowie Versuche zur Ablösungsverzögerung und Auftriebsverbesserung an angestellten Platten- und Tragflügelprofilen.

### Lorentzkraft und charakteristische Parameter

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen beziehen sich auf Kontrollmöglichkeiten mittels einer Lorentzkraft, welche durch eine *einfache* geometrische Konfiguration von Elektroden und Magneten erzeugt werden kann. Hierbei sind, wie in Abb. 1 gezeigt, alternierend



**Abb. 1** Magnet-/Elektroden-Geometrie für die Erzeugung einer oberflächenparallelen Lorentzkraft  $f_L$ . Zwischen den magnetischen Nord- und Südpolen sind Elektroden mit entsprechend positiver bzw. negativer Polarität eingebracht. Die Pfeile symbolisieren die daraus resultierenden Feldlinien des magnetischen (blau) und des elektrischen Feldes (grün). Der rote Pfeil symbolisiert die resultierende Lorentzkraft  $f_L$ .



**Abb. 2** Die Lorentzkraftdichte der Geometrie aus Abb. 1. Für diese einfache, periodische Geometrie kann die Stärke der Lorentzkraft pro Volumenelement exakt berechnet werden. In Abhängigkeit vom Abstand zur Oberfläche ( $y$ ) und von der Querrichtung ( $z$ ) ist die Stärke der Lorentzkraft farblich codiert dargestellt.

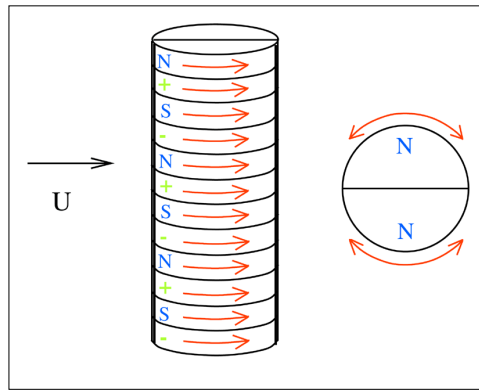
Elektroden und rechteckige Permanentmagneten der jeweils gleichen Breite an der Oberfläche des umströmten Körpers angeordnet. Damit wird eine Kraft parallel zur Wand erzeugt. Diese klassische Geometrie ist seit längerem bekannt [3]. Für eine solche periodische Anordnung kann die resultierende Kraftdichte exakt angegeben werden (Abb. 2). Mit zunehmendem Abstand von der Wand fällt die Stärke der Lorentzkraft exponentiell ab. Die Reichweite ist dabei durch die Elektroden- bzw. Magnetenbreite bestimmt. Zudem treten in Wandnähe nahe den Elektrodenecken Inhomogenitäten auf, welche auf Singularitäten in den Feldverteilungen zurückzuführen sind. Mit einer verbesserten Geometrie von Elektroden und Magneten ist es möglich, eine in Querrichtung ( $z$ ) homogene, exponentielle Kraftverteilung zu erreichen.

Entdimensionalisiert man die Navier-Stokes-Gleichung mit einer charakteristischen Länge

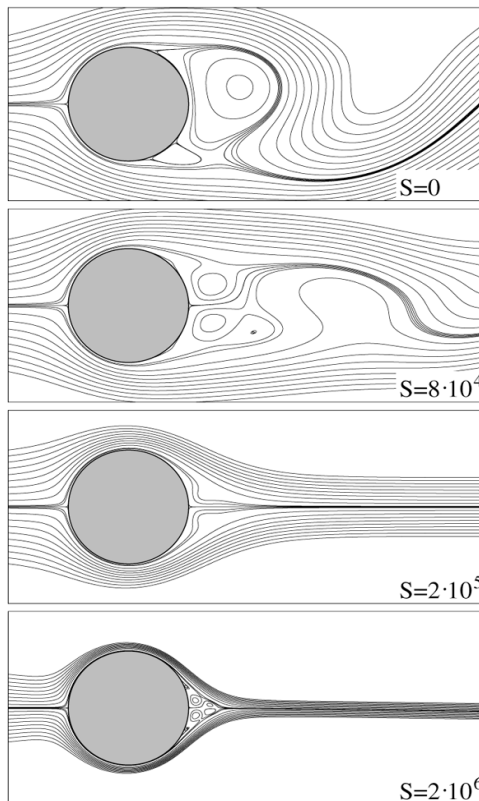
$L$  und der Anströmgeschwindigkeit  $U$ , so ergibt sich neben der bekannten Reynoldszahl  $Re = U \cdot L/\nu$  ( $\nu$ : kinematische Viskosität) ein charakteristischer Wechselwirkungsparameter  $N$  als Verhältnis von Lorentzkraft zu Trägheitskraft.  $N$  ist proportional zu  $1/U^2$ , was bedeutet, dass bei hohen Geschwindigkeiten deutlich größere Ströme für vergleichbare Wirkungen erforderlich sind. Jedoch spielen sich wesentliche Vorgänge ausschließlich in der Grenzschicht ab. Aus einer geeigneten Entdimensionalisierung der Grenzschichtgleichungen erhält man einen weiteren dimensionslosen Parameter  $Z$ , welcher das Verhältnis von Lorentzkraft zu viskosen Kräften beschreibt (siehe [4]). Dieser wird im folgenden als Tsinober-Shtern Parameter bezeichnet und ist proportional zu  $1/U$ . Das wirkliche Skalenverhalten der Lorentzkraft bei realen Anwendungen, gerade auch bei turbulenten Grenzschichten, wird letztendlich großen Einfluss auf die praktische Realisierbarkeit der Strömungskontrolle mittels elektromagnetischer Kräfte haben. Im geeigneten Design der Lorentzkraftverteilung besteht dabei ein großes Optimierungspotential.

### Ablösungskontrolle am Zylinder

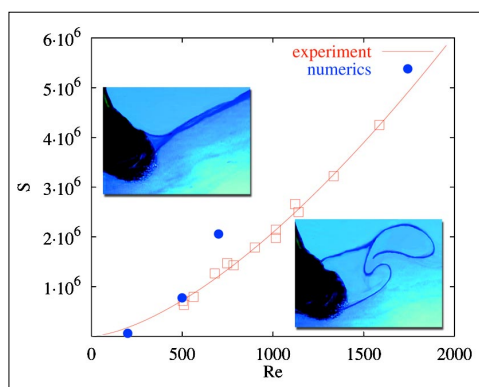
Als generisches Beispiel für die Umströmung eines stumpfen Körpers wurden experimentelle und numerische Untersuchungen zur Umströmung eines Kreiszylinders durchgeführt. Insbesondere stand im Vordergrund, inwieweit elektromagnetische Kräfte zur Kontrolle der Wirbelablösung eingesetzt werden können. Die verwendete Anordnung von Magneten und Elektroden ist in Abbildung 3 dargestellt und entspricht einer auf die Zylinderoberfläche aufgebrauchten Elektroden- und Magnetkonfiguration, wie sie in Abbildung 1 beschrieben ist. Diese Anordnung erzeugt oberflächenparallele Lorentzkräfte in oder gegen die Strömungsrichtung. Im Vordergrund stand zunächst der Einsatz statischer Lorentzkräfte. Die geschwindigkeitsunabhängige, dimensionslose Kraftamplitude ergibt sich als  $S = N \cdot Re^2$ . Abbildung 4 zeigt numerische Resultate der Umströmung bei einer Reynoldszahl  $Re = 200$  und verschiedenen Kraftamplituden. Für die Berechnung wurde ein eigener Finite-Differenzen-Code verwendet. Deutlich ist zu erkennen, dass mit der Erhöhung der Kraftamplitude eine Unterdrückung der Wirbelablösung erreicht wird. Abbildung 5 fasst experimentelle und numerische Ergebnisse in einem Stabilitätsdiagramm



**Abb. 3** Magnet-/Elektroden-Geometrie für die Erzeugung einer oberflächenparallelen Lorentzkraft am Kreiszylinder. Zwischen den magnetischen Nord- und Südpolen sind Elektroden mit entsprechend positiver bzw. negativer Polarität eingebracht. Durch Wahl der Polarität der Elektroden kann eine Lorentzkraft in bzw. gegen die Strömungsrichtung erzeugt werden.



**Abb. 4** Numerische Resultate der elektromagnetisch kontrollierten Zylinderumströmung. Dargestellt sind Stromlinien unter Wirkung einer Lorentzkraft in Strömungsrichtung bei  $Re = 200$ . Eine Erhöhung der Lorentzkraftamplitude  $S = N \cdot Re^2$  führt zur Unterdrückung der Wirbelablösung.



**Abb. 5** Stabilitätsdiagramm für stationäre Kräfte. Dargestellt sind die zur Unterdrückung der Wirbelablösung notwendigen Lorentzkraftamplituden  $S$  in Abhängigkeit von der Reynoldszahl  $Re$ . Die beiden Fotos zeigen die typische Strömungsform ober- bzw. unterhalb der Stabilitätskurve. (rote Kurve: Experiment; blaue Symbole: Numerisches Resultat)

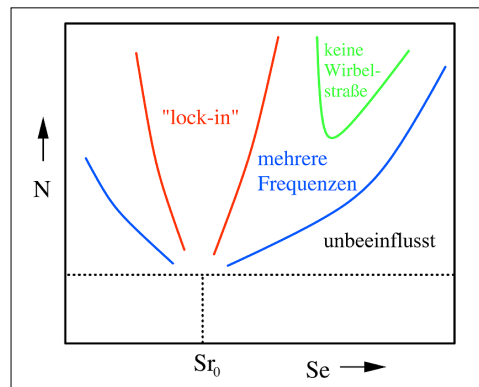
zusammen. Oberhalb der kritischen Kurve wird die Wirbelablösung unterdrückt, während unterhalb noch Wirbelablösung stattfindet.

Die Lorentzkraft beeinflusst natürlich ebenfalls integrale Strömungsgrößen wie z.B. die Reibungsbeiwerte. Die Unterdrückung der Wirbelablösung führt zu einer Verringerung des Druckwiderstandes, während die viskose Reibung aufgrund der in die Grenzschicht eingetragenen Wirbelstärke ansteigt. Zusätzlich entsteht eine Schubkomponente durch den in die Grenzschicht eingetragenen Impuls. Der Gesamtwiderstand wird damit wesentlich verringert bzw. in den hier betrachteten Strömungsregimes sogar negativ.

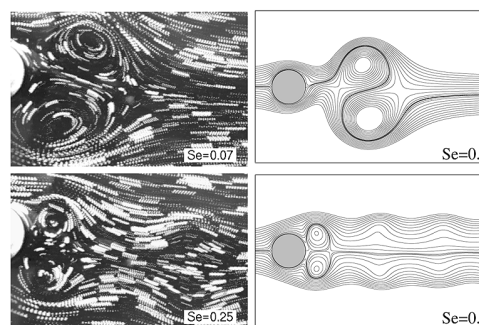
Neben den Einsatz statischer Felder können auch leicht Wechselfelder zur Strömungskontrolle eingesetzt werden. Bei oszillierenden Kräften hängt die Kontrollwirkung neben der Kraftamplitude auch vom Verhältnis zwischen der sog. Strouhalhäufigkeit der unkontrollierten Umströmung  $Sr_0$  (dimensionslose Frequenz der Wirbelablösung) und der dimensionslosen Erregerfrequenz  $Se$  ab. Das Spektrum der entstehenden Strömungen ist sehr vielfältig und reicht von „lock-in“-Regimes, d.h. dem Synchronisieren von Strouhal- und Erregerfrequenz, über Frequenzvervielfachungen, Mehrfrequenzregimes sowie auch stationären Zuständen bei unterdrückter Wirbelablösung bis hin zu Strömungen, welche scheinbar unbeeinflusst von der äußeren Erregung verbleiben, wenn die Erregerfrequenzen wesentlich größer oder kleiner als die Strouhalhäufigkeiten sind (siehe Abb. 6). Abbildung 7 zeigt in der Gegenüberstellung experimentelle und numerische Resultate in jeweils ähnlichen Strömungsregimes. In den oberen Abbildungen bilden sich außerhalb der Reichweite der Lorentzkraft alternierend ablösende, große Wirbel, während in den unteren Abbildungen die Kontrollwirkung der Lorentzkraft zwei symmetrische, stehende Wirbel nahe am Zylinder erzeugt.

### Grenzschichtuntersuchungen an einer ebenen Platte

Mit einer exponentiell abklingenden, homogenen Lorentzkraftdichte sollte es möglich sein, die sich ausbildende laminare Grenzschicht an der Platte in ein exponentielles Geschwindigkeitsprofil zu überführen, dessen Dicke nicht mehr anwächst [4]. Die kritische Reynoldszahl  $Re_{krit}$  bei der dieses Profil instabil wird (der Übergang zur Turbulenz einsetzt), ist um zwei Größenordnungen größer als  $Re_{krit}$  für das unkontrollierte Grenzschichtprofil. Mit Hilfe geeigneter Lorentzkraftverteilungen ist es also möglich, auch



**Abb. 6** Schematische Darstellung der Strömungsregimes in Abhängigkeit von Erregerfrequenz  $Se$  und Kraftamplitude  $S$ . In der Nähe der Strouhalhäufigkeit der unkontrollierten Strömung  $Sr_0$  sind im „lock-in“-Regime Strouhalhäufigkeit und Erregerfrequenz  $Se$  synchron. Neben Frequenzvervielfachungen, Mehrfrequenzregimes sowie auch stationären Zuständen bei unterdrückter Wirbelablösung gibt es, wenn die Erregerfrequenzen wesentlich größer oder kleiner als die Strouhalhäufigkeiten sind, auch Strömungen, welche scheinbar unbeeinflusst von der äußeren Erregung verbleiben.



**Abb. 7** Experimentelle (links,  $Re = 1100$ ,  $N = 3,3$ ) und numerische (rechts,  $Re = 200$ ,  $N = 5$ ) Resultate bei symmetrischem Kräfteintrag und verschiedenen Erregerfrequenzen  $Se$  in jeweils ähnlichen Strömungsregimes. In den oberen Abbildungen bilden sich außerhalb der Reichweite der Lorentzkraft alternierend ablösende, große Wirbel, während in den unteren Abbildungen die Kontrollwirkung der Lorentzkraft zwei symmetrische, stehende Wirbel nahe am Zylinder erzeugt.

bei großen Plattenlängen ein laminares (exponentielles) Grenzschichtprofil aufrecht zu erhalten. Da der Reibungswiderstand dieses laminaren Profils bedeutend kleiner ist als der einer turbulenten Grenzschicht, resultiert daraus eine entsprechende Verminderung des Gesamtwiderstandes des umströmten Körpers. Dies sollte mit vertretbarem energetischem Aufwand möglich sein, da zur Aufrechterhaltung des exponentiellen Profils nur ein geringer zusätzlicher Kräfteintrag nötig ist. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine homogene Lorentzkraftverteilung. Die aus der einfachen Geometrie (Abb. 1) resultierenden Inhomogenitäten



der Lorentzkraftstärke führen u.U. zur Erzeugung von Wirbelstärke in Strömungsrichtung und damit zur Anregung von Turbulenz. Um die prinzipielle Anwendbarkeit der Lorentzkraft zur Widerstandsverminderung zu demonstrieren und Vergleichsdaten für spätere Messungen mit verbesserter Lorentzkraftverteilung zu gewinnen, wurde eine Platte mit den Maßen 0,5m x 0,5m mit der beschriebenen Elektroden-/Magnet-Konfiguration experimentell in einem offenen Kanal der HSVA untersucht, der zu diesem Zweck mit Salzwasser befüllt wurde (siehe Abb. 8). In Abbildung 9 ist die in den Kanal eingebaute Platte mit Messaufbau (Mehrkomponentenwaage zur Kraftmessung) zu sehen. Im Ergebnis zeigt sich eine erhebliche Widerstandsverminderung, wenn beide Seiten der Platte mit Strom beaufschlagt werden: Bei einer Reynoldszahl von  $Re = 1,8 \cdot 10^5$  kann der Gesamtwiderstand fast vollständig kompensiert werden, wenn die Lorentzkraft nur genügend groß gewählt wird. In Abb. 10 ist der dimensionslose Widerstandsbeiwert

$$C_D = \frac{F_W}{A \frac{\rho}{2} U^2}$$

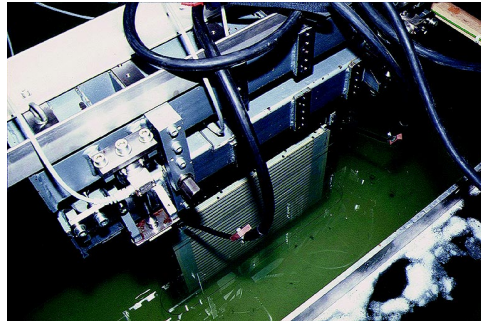
aufgetragen, der sich als gemessene Widerstandskraft ( $F_W$ ) pro Flächeneinheit ( $A$ ) geteilt durch den Staudruck der Anströmung  $\frac{\rho}{2} \cdot U^2$  ergibt. Dem maximalen Tsinober-Shtern-Parameter ( $Z = 12,9$ ) entsprach im Versuch ein Gesamtstrom von 50 A je Plattenseite. Abbildung 11 zeigt eine Messung des Geschwindigkeitsverlaufs in Wandnähe mittels eines Laser-Doppler-Anemometers (LDA), nahe der hinteren Kante der Platte. Der Parameter  $Z = 0$  entspricht dem unbeeinflussten Fall des Grenzschichtverlaufs (schwarze Symbole). Schon für  $Z = 1,2$  zeigt sich eine merkliche Änderung der Form des Grenzschichtprofils (blaue Symbole). Für maximales  $Z = 12,9$  wird in der Grenzschicht bereits eine Art Wandstrahl erzeugt. Aufgrund der Inhomogenität der Lorentzkraft (siehe Abb. 2) variiert das Geschwindigkeitsprofil geringfügig in Querrichtung (rote Symbole: über der Elektroden-/Magnet-Ecke; grüne Symbole: über der Magnetmitte).

### Ablösungskontrolle an einem angestellten Ruder

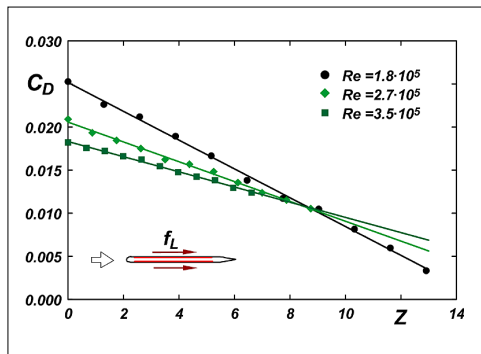
An einer längs angeströmten, ebenen Platte kann eine Seitenkraft erzeugt werden, wenn die Lorentzkraft auf beiden Seiten in unter-



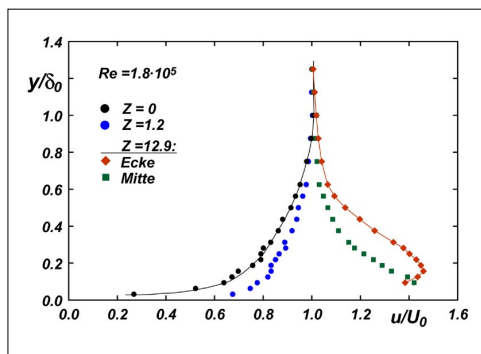
**Abb. 8**  
Umwelttank der Hamburgischen Schiffbauversuchsanstalt (HSVA).



**Abb. 9**  
Messaufbau mit Platte. Eine Platte mit den Maßen 0,5m x 0,5m mit der beschriebenen Elektroden-/Magnet-Konfiguration aus Abb. 1 in einem offenen, mit Salzwasser befüllten Kanal der HSVA. Ergebnisse siehe Abb. 10.



**Abb. 10**  
Verminderung des Widerstandsbeiwertes  $C_D$  einer längs angeströmten Platte in Abhängigkeit der Anregung für verschiedene Reynoldszahlen.  $Z$  ist, bei konstanter Reynoldszahl  $Re$ , direkt proportional zur Stärke der eingetragenen Lorentzkraft  $f_L$  bzw. zum Strom durch die Elektroden.



**Abb. 11**  
Grenzschichtprofile der längs angeströmten Platte unter Lorentzkraft-Einfluss. Schon für geringe Kräfte ( $Z = 1,2$ ) zeigt sich eine merkliche Abweichung der Form des Grenzschichtprofils (blaue Symbole) vom unbeeinflussten Fall ( $Z = 0$ , schwarze Punkte). Für eine maximale Kraft ( $Z = 12,9$ ) wird in der Grenzschicht bereits ein Wandstrahl erzeugt. Aufgrund der Inhomogenität der Lorentzkraft variiert das Geschwindigkeitsprofil geringfügig in Querrichtung (rote Symbole: über der Elektroden-/Magnet-Ecke; grüne Symbole: über der Magnetmitte).

schiedliche Richtung wirkt. Unsymmetrische Lorentzkräfte tragen in die Strömung eine Zirkulation ein und erzeugen somit eine Auftriebskraft (Magnus-Effekt). Eine wesentliche Steigerung der Wirkung einer wandparallelen Lorentzkraft ist bei der Beeinflussung der Umströmung einer *schräg angestellten* Tragfläche zu erwarten. Hier spielt nicht allein die durch den eingetragenen Schub erhöhte Zir-

kulation eine Rolle, sondern in wesentlich höherem Maße der Auftriebsgewinn, der durch Verhinderung oder die Verzögerung der Grenzschichtablösung bei größeren Anstellwinkeln erzielt werden kann. Die prinzipielle Vorgehensweise ist in der Aerodynamik seit den 20er Jahren dieses Jahrhunderts bekannt und experimentell erprobt. An der Saugseite des Tragflügels ist die Grenzschicht einem Druckanstieg der Außenströmung ausgesetzt, der ab einem bestimmten Anstellwinkel so groß wird, dass die kinetische Energie des Fluids in der Grenzschicht nicht mehr ausreicht, ihn zu überwinden: die Strömung reißt ab. Um dies zu verhindern, muss der Grenzschicht in geeigneter Weise Energie zugeführt werden. Traditionell dafür genutzte Methoden sind die Grenzschichtabsaugung, das Ausblasen von Fluid an der Körperoberfläche oder die Verwendung mitbewegter Wände.

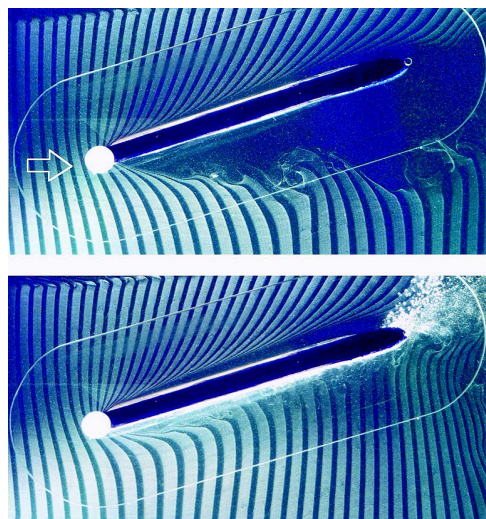
Abbildung 12 zeigt in einer Visualisierung die Ablösungsunterdrückung an einer angestellten Platte durch eine auf der Saugseite eingebrachte Lorentzkraft. Im folgenden soll die Wirkung der Lorentzkraft zur Auftriebsverbesserung an einem Schiffsruder dargestellt werden. Eine naheliegende Anwendung hierfür ist die Verbesserung der Manövrierfähigkeit von See-

schiffen. Hierzu wurde ein *symmetrisches* Ruderprofil PTL-4, ähnlich dem NACA-0017, ausgewählt (d.h. es wird beim Anstellwinkel Null noch kein Auftrieb erzeugt). Die Magnetbreite bzw. der Elektrodenabstand am Modell betrug  $a = 10 \text{ mm}$  (siehe Abb. 13). Anhand von Kraftmessungen, welche im Umwelttank der HSVA durchgeführt wurden, wurde der Auftriebsbeiwert

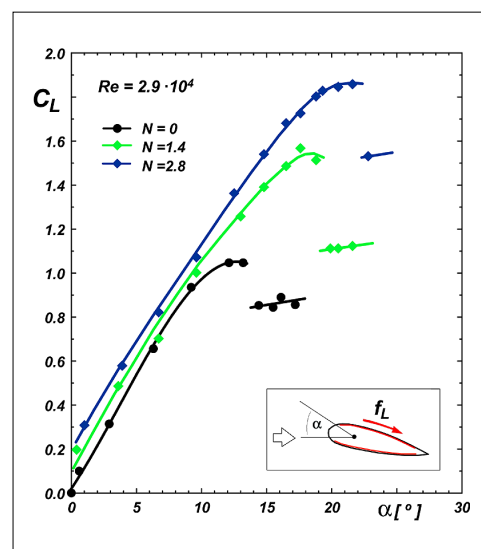
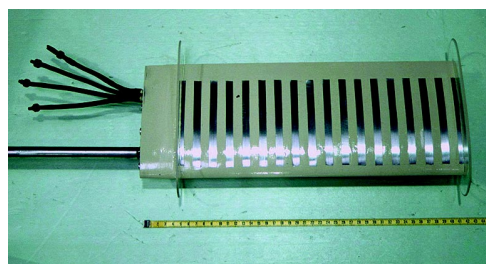
$$C_L = \frac{F_A}{A \frac{\rho}{2} U^2}$$

(Auftriebskraft ( $F_A$ ) pro Flächeneinheit ( $A$ ) geteilt durch Staudruck) in Abhängigkeit vom Anstellwinkel  $\alpha$  vermessen. Wird das Ruder eingeschlagen, so wächst proportional zum Anstellwinkel  $\alpha$  die Seitenkraft (Auftrieb), bis bei einem bestimmten Winkel die Strömung auf der Saugseite des Profils abreißt, was zu einem plötzlichen Abfall des Auftriebs und somit zu verminderter Steuerwirkung des Ruders führt. Abb. 14 zeigt den Verlauf von  $C_L$  für das beschriebene Ruder bei einer Reynoldszahl von  $Re = 2,9 \cdot 10^4$ . Im unbeeinflussten Fall (schwarze Symbole) reißt die Strömung bei einem Winkel von ca.  $13^\circ$  ab. Hierdurch entsteht ein deutlicher Einbruch im Auftriebsbeiwert  $C_L$ . Für einen Wert des Wechselwirkungsparameters

**Abb. 12**  
Ablösungsunterdrückung an einer schräg angeströmten Platte. Oben: ohne - ; unten: mit Lorentzkrafteintrag auf der Saugseite (Unterseite). Strömungsrichtung ist von links nach rechts (Pfeil). Die Strömung löst ohne Lorentzkraft bereits nahe der Vorderkante ab und wird turbulent (oben). Mit zugeschalteter Lorentzkraft bleibt die Strömung angelegt (unten).



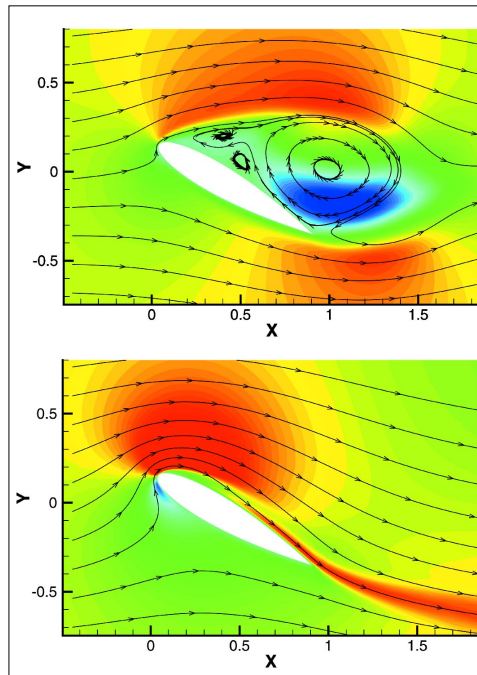
**Abb. 13**  
Mit Elektroden und Magneten bestücktes Schiffsruder-Modell.



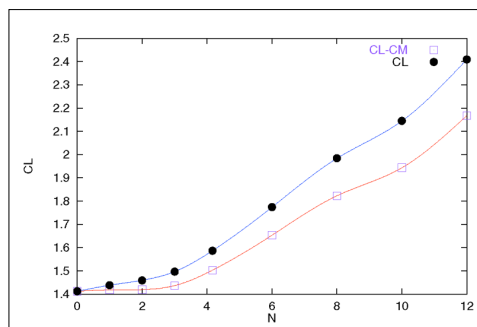
**Abb. 14**  
Auftriebsverbesserung am Rudermodell durch Ablösungsunterdrückung. Für verschiedene starke Kraftwirkungen  $N$  ist der Auftriebsbeiwert  $C_L$  eines Profils in Abhängigkeit vom Anströmwinkel  $\alpha$  aufgetragen. Im Vergleich zur Umströmung ohne elektromagnetische Kontrolle ( $N=0$ ) wird ein stärkerer Auftrieb und damit eine größere Ruderwirkung erzielt; auch reißt die Strömung erst bei größeren Anstellwinkeln ab (die Lorentzkraft wirkt auf der Saugseite des angestellten Profils).

$N=2,8$  (entspricht einem Strom von 38 A auf der Saugseite des untersuchten Rudermodells) ist der kritische Winkel zu einem Wert von  $\alpha = 22^\circ$  hin verschoben (dunkelblaue Symbole im Bild). Damit einher geht eine erhebliche Erhöhung des Auftriebsbeiwertes um ca. 90 %. Die mit wachsendem  $N$  erzielten geringfügigen Auftriebsverbesserungen bei Winkeln  $\alpha < 10^\circ$  beruhen auf der durch die Lorentzkraft eingetragenen, zusätzlichen Zirkulation. Der Hauptanteil des Auftriebsgewinns bei größeren Anstellwinkeln beruht klar auf der erzielten Ablösungsverzögerung. In praktischer Hinsicht ist interessant, dass nicht notwendigerweise die gesamte Ruderoberfläche mit Elektroden und Magneten bestückt sein muss; Versuche an einer schräg angeströmten Platte sowie am Rudermodell bestätigten, dass es völlig ausreichend ist den Oberflächenbereich nahe der Vorderkante mit Magneten und Elektroden auszustatten. Hier besteht ein Optimierungspotential. Begleitend zu den experimentellen Untersuchungen erfolgten direkte numerische Simulationen der kontrollierten Umströmungen bei niedrigeren Reynoldszahlen. Hierzu wurde ein hochgenauer und geometrisch flexibler Navier-Stokes-Code verwendet, in welchen die entsprechenden Lorentzkraftterme implementiert wurden [5]. Alle Rechnungen erfolgten in zweidimensionaler Näherung, da die strömungs- und wandparallelen Kräfte eventuell auftretende dreidimensionale Effekte sicherlich dämpfen oder gar unterdrücken.

Abb. 15 zeigt oben ein Bild der numerisch berechneten, unkontrollierten transienten Umströmung eines angestellten Ruders. Deutlich sind Wirbelbildung und Wirbelablösung zu erkennen. Unten ist hingegen die kontrollierte Umströmung abgebildet. Die Kraftamplitude ist hier so groß gewählt, dass die Wirbelablösung völlig unterdrückt wird und die Umströmung stationär verläuft. Für Experimente bei höheren Reynoldszahlen ist die vollständige Unterdrückung der Wirbelablösung kaum zu erreichen. Jedoch kann bereits die Ablösungsverzögerung eine erhebliche Auftriebsverbesserung bewirken. Abb. 16 zeigt das berechnete Verhalten des Auftriebsbeiwertes bei fester Reynoldszahl als Funktion der Lorentzkraft. Das Maximum der Lorentzkraft wurde so gewählt, dass wie in den Experimenten die Umströmung über den gesamten dargestellten Bereich instationär erfolgt. Deutlich ist zu erkennen, dass der Auftriebsgewinn  $C_M$  durch den direkten Impulseintrag der Lorentzkraft in die Grenzschicht nur linear



**Abb. 15** Unkontrollierte (oben:  $N=0$ ) und kontrollierte (unten:  $N=40$ ) Umströmung eines angestellten Ruders PTL-4;  $\alpha = 30^\circ$ ,  $Re = 500$ ,  $a = 1$  cm. Dargestellt sind Stromlinien sowie farblich codiert die Geschwindigkeitskomponente in Hauptströmungsrichtung,  $u_x$ .



**Abb. 16** Auftriebsbeiwert mit - ( $C_L$ ) und ohne Lorentzkraftanteil ( $C_L - C_M$ ) am PTL-4 Ruder. Anstellwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , Reynoldszahl  $Re = 600$ . Der Auftriebsgewinn durch den Impulseintrag der Lorentzkraft ( $C_M$ ) steigt nur linear mit der Kraftamplitude  $N$ . Der Hauptanteil der Auftriebsverbesserung resultiert aus der Umströmungsveränderung (Ablösungsunterdrückung).

mit der Kraftamplitude  $N$  anwächst. Der Hauptanteil der Auftriebsverbesserung jedoch resultiert aus der entsprechenden Umströmungsveränderung und der Ablösungsverzögerung. Mit wachsender Kraftamplitude dominiert dieser Effekt deutlich.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die elektromagnetische Umströmungskontrolle erweist sich als ein interessantes Forschungsgebiet mit vielen möglichen Anwendungen im Schiffbau. Praktische Probleme wie die Korrosion der Elektroden in Salzwasser sind durch entsprechende Materialauswahl bereits gelöst. Die gezeigten experimentellen und numerischen Resultate demonstrieren eindrucksvoll die erzielbaren Kontrolleffekte, welche quantitativ durchaus mit denen anderer Kontrollmethoden vergleichbar sind. Zusätzlich bietet die Möglichkeit der kontaktlosen und trägheits-

freien Steuerung der elektromagnetischen Kräfte Vorteile gegenüber den herkömmlichen Methoden. Des Weiteren sind viele potentielle Optimierungsmöglichkeiten noch nicht ausgeschöpft.

Es ist wichtig zu betonen, dass die energetische Bilanz des eingebrachten Kontrollmechanismus für die speziellen Anwendungen an Rudern, Flossen, Propellerzuströmungen etc. von untergeordneter Bedeutung ist. Hier geht es primär darum, einen maximalen Kontrolleffekt zu erzielen, wobei praktische Kriterien wie Regelbarkeit, kleine Durchlaufzeiten oder resultierende Konstruktionsvereinfachungen im Vordergrund stehen. Der dafür notwendige energetische Aufwand ist im Rahmen der energetischen Gesamtbilanz von Schiffen meist vernachlässigbar.

Die meisten experimentellen Untersuchungen zur Plattengrenzschicht und Ruderumströmung, welche relativ hohe Geschwindigkeiten erforderten, erfolgten an der HSVA in einem offenen Kanal (siehe Abb. 8) sowie in einem Umlaufkanal. Gleichzeitig erfolgte im FZR der Aufbau eigener Versuchseinrichtungen, um Experimente bei höheren Geschwindigkeiten zu ermöglichen. Abbildung 17 zeigt den sich in der Fertigstellungsphase befindlichen großen Elektrolyt-Umlaufkanal, welcher Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 5 m/s ermöglichen wird. Die Experimente zur Platten- und Ruderumströmung waren von vornherein auf Anwendungen bei hohen Reynoldszahlen ausgerichtet, welche sich einer direkten numerischen Behandlung aus Rechenpeicher- oder Rechenzeitgründen leider noch auf Jahre entziehen. Trotzdem wurden hier zunächst numerische



**Abb. 17**

Der Elektrolyt-Umlaufkanal der Arbeitsgruppe Magneto-hydrodynamik am FZR.

In der geschlossenen Messstrecke von 30 cm x 40 cm Querschnitt und 120 cm Länge werden Modellversuche in einer turbulenzarmen Strömung bei Geschwindigkeiten bis zu 5 m/s möglich sein.

Simulationen bei *niedrigeren* Reynoldszahlen ausgeführt, um Größenordnungen sowie Trends der Effekte zu beurteilen und Optimierungsmöglichkeiten auszuloten. Die Anwendung bekannter Turbulenzmodellierungen mit theoretisch und empirisch abgeleiteten Wandgesetzen ist problematisch, da die elektromagnetische Kraft gerade im wandnahen Bereich ihre Wirkung entfaltet. Daher soll in einem nächsten Schritt versucht werden, mittels *angepasster* Turbulenzmodelle numerische Simulationen bei hohen Reynoldszahlen auszuführen, welche die Wirkung der Lorentzkraft auf die Wandgrenzschichten berücksichtigen. Weitergehende Untersuchungen beschäftigen sich mit dem optimalen Design von Lorentzkräften sowie möglichen Anwendungen elektromagnetischer Kontrollmethoden in der Elektrochemie.

#### Literaturverzeichnis

- [1] A. Thess, G. Gerbeth, *Magneto-hydrodynamik*, Phys. Blätter 54 (1998) 125-130.
- [2] G. Gerbeth (Ed.), *Proceedings of the International Workshop on Electromagnetic Boundary Layer Control (EBLC) for Saltwater Flows*, Dresden, July 7-8, 1997
- [3] A. Gailitis and O. Lielausis (1961), *Applied Magneto-hydrodynamics*. Reports of the Physics Institute 12, Riga, 143 (in Russisch)
- [4] A.B. Tsinober, A.G. Shtern, *Magnitnaya Gidrodinamica*, S.152-154, 1967 (in Russisch)
- [5] G.E. Karniadakis, E.T. Bullister and A.T. Patera, *A spectral element method for solution of the 2-D and 3-D time-dependent incompressible Navier-Stokes equations*, in: Proc. Conf. Finite El. Meth. Nonl. Probl., ed. by P. Bergan et al., Springer 1986, pp. 803-817.

# CHARAKTERISIERUNG GESTÖRTER REGIONALER HIRNFUNKTIONEN MIT HILFE VON PET

Wolfgang Burchert, <sup>1</sup>Bettina Beuthien-Baumann, Peter Brust, <sup>2</sup>Vjera Holthoff, <sup>1</sup>Jörg Pinkert, <sup>3</sup>Wolfgang Handrick, <sup>5</sup>Thomas Schmidt, <sup>4</sup>Ingo Gerdson, Wolf-Gunter Franke.

Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie und Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin<sup>1</sup> in Kooperation mit der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie<sup>2</sup> der TU Dresden, der Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie<sup>3</sup> TU Dresden, der Abt. für Neuroradiologie<sup>4</sup> des Institutes und Poliklinik für Radiologische Diagnostik TU Dresden und der Rehabilitationsklinik Pulsnitz<sup>5</sup>

Die Funktionen des Gehirns basieren auf einer komplexen Interaktion von Nervenzellgruppen, die zu spezifischen funktionellen Systemen zusammengefasst sind. Informationsübertragungen zwischen den verschiedenen Nervenzellen erfolgen über besondere Verknüpfungsstellen, sog. Synapsen. Die Übertragung und Verarbeitung von Informationen durch Nervenzellen erfordert einerseits Energie, andererseits müssen die Botenstoffe (Neurotransmitter) für die Übertragung der Information zwischen den Nervenzellen synthetisiert werden. Besondere zelluläre Strukturen sorgen für die Informationsweiterleitung (Rezeptoren) oder für eine Wiederaufnahme (Transporter) der Botenstoffe aus dem synaptischen Spalt. Die Botenstoffe der Zellen sind häufig spezifisch für das neurofunktionelle System, in dem sie arbeiten.

Bei Erkrankungen des Gehirns können unterschiedliche Ursachen die normale Hirnfunktion beeinträchtigen. Hier bieten nuklearmedizinische funktionsdiagnostische Verfahren Zugang zu spezifischen Informationen, die über die rein morphologisch orientierte radiologische Diagnostik hinausgehen. Nuklearmedizinische Verfahren können durch das zugrunde liegende Tracerprinzip (s.u.) ohne Beeinflussung der Körperfunktionen physiologische oder Stoffwechsellvorgänge erfassen, den Stoffwechsel von Neurotransmittern charakterisieren oder auch Rezeptoren nachweisen sowie deren Funktionszustand messen. Dieses hochempfindliche Arsenal kann in der Grundlagen- und klinischen Forschung unmittelbar helfen, Krankheitsprozesse zu charakterisieren, zu differenzieren sowie auch therapeutische Ansätze *in vivo* zu bewerten.

In der Nuklearmedizin ist dabei die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) ein konkurrenzloses Verfahren zur nichtinvasiven Quantifizierung von Organfunktionen und Stoffwechsellvorgängen beim Menschen. Durch seine hervorragende Empfindlichkeit, die Möglichkeit zur

Korrektur der körpereigenen Abschwächung der emittierten Strahlung und durch die sehr gute Bildauflösung ist die Möglichkeit gegeben, Stoffwechsellleistungen und Funktionen auf molekularer Ebene spezifisch und quantitativ nachzuweisen.

## Radiotracer

Zur Durchführung einer Positronen-Emissions-Tomographie wird dem Patienten eine radioaktiv markierte Substanz – der sog. Radiotracer – in eine Armvene injiziert. Dieses Radiodiagnostikum ist ein Biomolekül, in das ein spezielles Radionuklid mit sehr kurzer Halbwertszeit (z.B. Fluor-18 oder Kohlenstoff-11) eingebaut wurde. Derartige Biomoleküle kommen entweder im Körper vor oder sind körpereigenen Molekülen sehr ähnlich, wobei sie für den diagnostischen Einsatz definierten Stoffwechselprozessen unterliegen oder Botenfunktionen im Organismus erfüllen müssen. Durch die radioaktive Markierung der Substanzen kann der Weg des Radiopharmakons im Körper über den Nachweis der emittierten-radioaktiven Strahlung ohne äußeren Eingriff verfolgt werden.

Die Positronen-Emissions-Tomographie nutzt die beschriebenen Eigenschaften der eingebauten Radionuklide zur Bildgebung aus. Radionuklide, welche von Natur aus einen Mangel an Neutronen aufweisen, stabilisieren sich unter Aussendung eines Positrons. Beim Zerfall eines solchen Positronenstrahlers vereinigt sich nach kurzer Wegstrecke das ausgesandte Positron mit einem Elektron, wobei zwei Gamma-Quanten entstehen, die gleichzeitig (koinzident) unter einem Winkel von etwa 180° ausgesandt werden. Der Nachweis (Detektion) solcher Koinzidenzzerfälle erfolgt mit einem Positronen-Emissions-Tomographen, dessen Detektoren ringförmig um den Patienten

**Abb. 1**

Positronen-Emissions-Tomograph vom Typ Siemens ECAT EXACT HR+ des Forschungszentrums Rossendorf. Die Detektoren sind kreisförmig um die Patientenöffnung angeordnet.



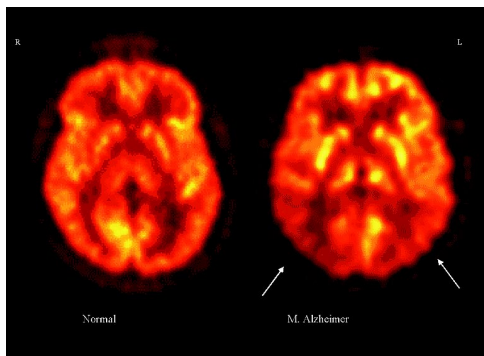
ten angeordnet sind (Abbildung 1). Aus den aufgenommenen Messdaten kann dann mittels mathematischer Verfahren die räumliche und zeitliche Verteilung des PET-Radiodiagnostikums quantitativ bestimmt werden.

Das bei der Positronen-Emissions-Tomographie sowohl in der Forschung als auch in der Klinik am häufigsten verwendete Radiodiagnostikum ist 2-[<sup>18</sup>F]Fluor-2-desoxy-D-glukose ([<sup>18</sup>F]FDG). Dies hat seine Ursache darin, dass [<sup>18</sup>F]FDG sich als sehr effektiver Tracer für die Messung von regionalem Energieumsatz, den Nachweis erhaltener Gewebektivität, der Ischämie sowie der Identifizierung von einer Vielzahl von Tumoren sowie entzündlichen Veränderungen erwiesen hat.

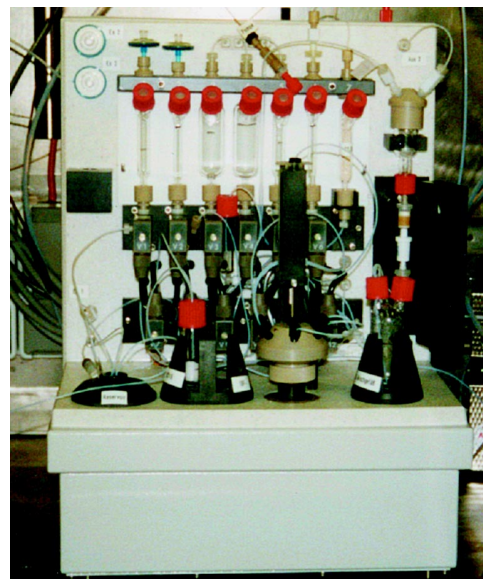
Da die Glukose für das Gehirn das exklusive Substrat für die Energiegewinnung darstellt, korrespondiert der regionale Glukoseumsatz unmittelbar mit dem neuronalen Energieverbrauch, der wiederum überwiegend mit der synaptischen Aktivität der Nervenzellen korreliert ist. Die Verteilung des regionalen Glukoseumsatzes in der Hirnrinde spiegelt daher im Wesentlichen die regionale neuronale Aktivität, also letztlich die Informationsverarbeitung wider. Die Lokalisation und die Intensität der mit PET beobachteten Veränderungen des Glukosestoffwechsel lassen daher Rückschlüsse auf die Art der Veränderung der Hirntätigkeit sowie auf deren Intensität zu (Abbildung 2).

**Abb. 2**

Messung des regionalen Glukosestoffwechsels ([<sup>18</sup>F]FDG) mit der Positronen-Emissions-Tomographie. Dargestellt sind horizontale Schnitte durch das Gehirn. Beim M. Alzheimer (rechts) findet sich eine deutliche Verminderung des Stoffwechsels in der Hirnrinde zwischen dem Scheitellappen und dem Schläfenlappen (Pfeile) verglichen mit dem Stoffwechsel von einer nicht erkrankten Person (links).



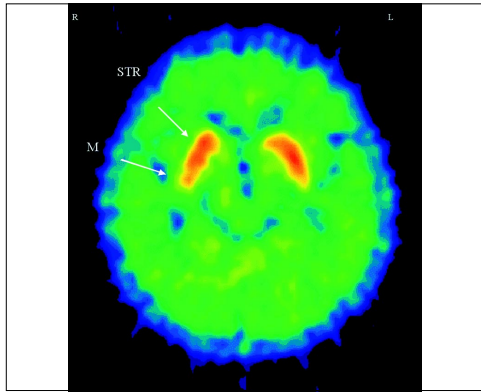
Wegen der kurzen Halbwertszeit der verwendeten Radionuklide erfolgt die Synthese unmittelbar vor den Patientenuntersuchungen. Zunächst wird in einem Zyklotron das Markierungsnuklid <sup>18</sup>F-Fluor hergestellt. Dieses Radionuklid liegt in einer sehr hohen Konzentration und damit einer sehr hohen Aktivität vor und muss deshalb mit Hilfe automatischer Anlagen gehandhabt werden. Nach zwei Syntheseschritten entsteht als Endprodukt [<sup>18</sup>F]FDG, und ist nach Reinigung und einer pharmazeutischen Qualitätskontrolle bereit zur Anwendung (Abbildung 3).



**Abb. 3**

Syntheseapparatur für die Herstellung von [<sup>18</sup>F]Fluor-Desoxyglukose ([<sup>18</sup>F]FDG). Die Herstellung erfolgt weitgehend automatisiert in abgeschirmten Bleiboxen. Nach Ende der Synthese werden umfangreiche Qualitätskontrollen zur Bestätigung der Güte des Radiopharmakons durchgeführt, bevor der Tracer zur Injektion freigegeben wird.

Neurofunktionelle Systeme des Gehirns sind häufig in unterschiedlichen Hirnregionen lokalisiert, verwenden aber als Gemeinsamkeit einen einheitlichen Botenstoff, wie z.B. Dopamin oder Serotonin. Der Stoffwechsel, der Transport oder die spezifische Bindung dieser Transmitter an Rezeptoren kann mit der PET quantitativ gemessen werden (Abbildung 4). Zur Charakterisierung des dopaminergen Systems ist die Messung des Dopaminstoffwechsels mit der Aminosäure 6-[<sup>18</sup>F]Fluor-DOPA ([<sup>18</sup>F]FDOPA) wissenschaftlich sehr gut ausgewiesen, aber nur an sehr wenigen Stellen in Deutschland praktisch für wissenschaftliche Fragestellungen verfügbar. Die im PET-Zentrum Rossendorf



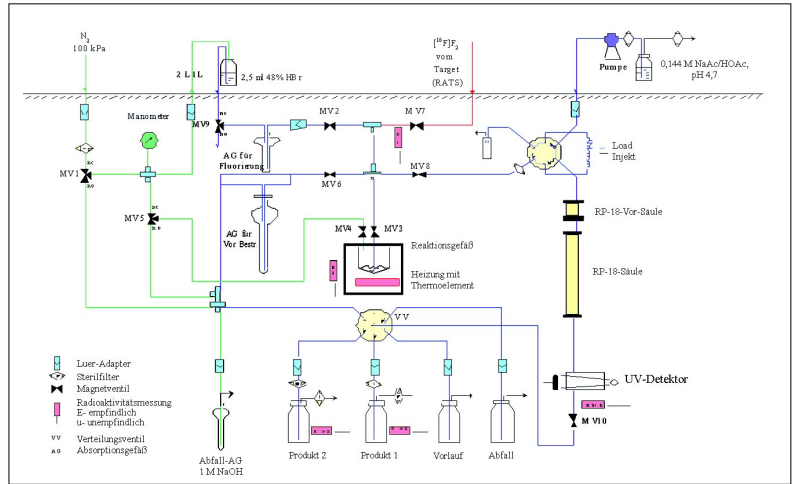
**Abb. 4** Patient mit Verdacht auf M. Parkinson (Schüttellähmung). Die Abbildung zeigt eine intensive Aufnahme des [<sup>18</sup>F]FDOPA im Bereich des Striatums beiderseits (STR = Streifenkörper). Eine diskrete Minderung (M) im hinteren Anteil des Striatums rechts weist auf eine beginnende Erkrankung hin.

angewandte Synthese ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

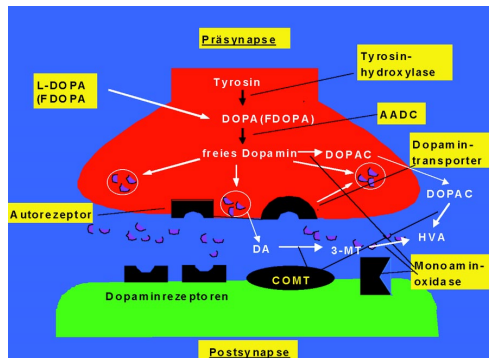
Im Folgenden soll nun auf verschiedene neurologische und psychiatrische Erkrankungen eingegangen werden, bei denen die Zusammenhänge zwischen dem jeweiligen Krankheitsgeschehen und dem Energiehaushalt des Gehirns bzw. Störungen im Bereich von cerebralen Botenstoffen näher analysiert werden.

### Regulation des Dopaminmetabolismus unter Sauerstoffmangel

Frühkindliche Hirnschäden treten in den entwickelten Industrieländern mit einer Häufigkeit von 2 bis 4 auf 1000 Lebendgeburten auf. Diese Hirnschäden sind häufig durch einen Sauerstoffmangel des Gehirns unmittelbar vor oder während der Geburt verursacht. Hierbei sind besonders die Bewegungszentren des Gehirns betroffen. Geistige Behinderungen können, müssen aber nicht, parallel dazu auftreten. Die Prophylaxe und Behandlung derartiger irreversibler Hirnschädigungen ist bis heute problematisch. Dies ist unter anderem durch einen noch unzureichenden Kenntnisstand über die Schädigungsmechanismen bedingt. Durch gezielte tierexperimentelle Untersuchungen können hier Fortschritte erzielt werden. Ein geeignetes Tiermodell zur Untersuchung der Pathomechanismen der frühkindlichen Hirnschädigung sind neugeborene Ferkel. Da besonders Hirnbereiche zur Steuerung von Bewegungsabläufen bei dieser Art von Schädigung betroffen sind, und diese meist einen



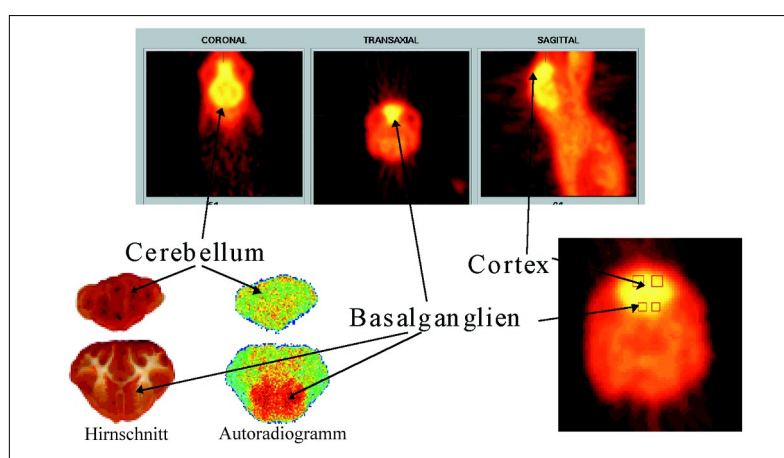
**Abb. 5** Schematische Darstellung der im FZ-Rossendorf entwickelten Syntheseapparatur für die Herstellung von [<sup>18</sup>F]FDOPA.



**Abb. 6** Schematische Darstellung einer dopaminergen Synapse. Die Synthese des Botenstoffes Dopamin kann durch die Gabe von markiertem [<sup>18</sup>F]FDOPA verfolgt werden, um damit Aufschlüsse über die Aktivität der dopaminergen Neuronen zu erhalten.

bestimmten Botenstoff, nämlich das Dopamin (Abbildung 6), zur Übertragung der Information zwischen den Nervenzellen verwenden, ergibt sich hier ein Ansatzpunkt für die Erforschung der Pathomechanismen der frühkindlichen Hirnschädigung. Die Basalganglien stellen dabei zentrale Strukturen des dopaminergen Systems dar. Von hier aus existieren weitere Verschaltungen zur Steuerung und Ausführung von Bewegungen zu bestimmten Bereichen der Hirnrinde, des Mittel- und Zwischenhirnes. Die Integrität oder die Schädigung des dopaminergen Systems kann *in vivo* spezifisch und quantitativ mit [<sup>18</sup>F]FDOPA, einer modifizierten Vorstufe des Dopamins mit der PET untersucht werden. Bei dieser Messung kann die Aktivität eines wichtigen Enzyms zur Synthese des Dopamins in den Nervenzellen quantitativ bestimmt werden. Weiterführende Aussagen zum Schädigungsgrad der Zellen im dopaminergen System sind ebenfalls möglich. Zur Durchführung der PET-Untersuchung wird gewichtsabhängig dosiert das [<sup>18</sup>F]FDOPA in-

jiziert. Bei der Quantifizierung des Stoffwechsels müssen die während der Untersuchung entstehenden Stoffwechselprodukte mittels eines chromatographischen Verfahrens (HPLC) aus Blutproben bestimmt werden und als Korrektur in die Messung eingebracht werden. Die Bestimmung der kinetischen Parameter erfolgt auf der Basis eines mathematischen Modells – eines sog. Kompartimentmodells –, welches eine vereinfachte formalisierte Beschreibung des Stoffwechsels beinhaltet. Ein Beispiel einer solchen PET-Untersuchung und korrespondierender Autoradiographien nach Sektion zeigt die Abbildung 7.



**Abb. 7**  
Anreicherung von [<sup>18</sup>F]FDOPA im Gehirn eines neugeborenen Ferkels. Das Maximum der Anreicherung findet sich in den Basalganglien. Dargestellt sind die PET-Aufnahmen, die im lebenden Organismus durchgeführt werden können sowie die herkömmlich hergestellten Autoradiogramme (oben; 3 orthogonale Schnitte, rechts Vergrößerung des mittleren Schnittes) sowie die Autoradiogramme mit den korrespondierenden anatomischen Schnitten (unten links).

Mit der hier beschriebenen Methode wurden unterschiedliche Transportprozesse quantitativ ausgewertet. Es konnte gezeigt werden, dass bei Sauerstoffmangel die Enzymaktivität der aromatische Aminosäuredecarboxylase, dem Schlüsselenzym für die Synthese des Dopamins erhöht ist, der Transport der Vorläufersubstanzen ins Gehirn über die Blut-Hirnschranke jedoch nicht gleichsinnig verändert ist. Weiterhin ergab sich aus den durchgeführten Untersuchungen eine verminderte Bildung von Stoffwechselprodukten unter Sauerstoffmangel durch das Enzym Catechol-O-Methyltransferase. Weiterhin wurde unter Sauerstoffmangel eine deutliche Zunahme der Hirndurchblutung gemessen. Somit gelang es mit dieser Untersuchung, Störungen im Neurotransmitterstoffwechsel besser zu charakterisieren und so zum Verständnis der pathophysiologischen

Vorgänge bei der Mangelversorgung des Gehirnes mit Sauerstoff beizutragen.

### Neuronale Fehlfunktionen beim idiopathischen Torticollis

Der idiopathische Torticollis (sog. Schiefhals) ist eine Form einer Bewegungsstörung (fokale Dystonie) im Erwachsenenalter. Die erkrankten Patienten fallen durch unwillkürliche, wiederholte Kopfbewegungen oder eine abnormale Kopfhaltung auf. Die Ursache dieser Erkrankung ist bisher nicht vollständig bekannt, stellt aber für den Patienten eine erhebliche psychische Belastung dar. Eine Behandlung ist bisher nur symptomatisch durch Injektionen von Botulinustoxin in die Halsmuskulatur möglich. Eine weitere Untersuchung der Erkrankungszusammenhänge könnte zusätzliche Informationen zu den Krankheitsmechanismen liefern und damit einen Beitrag zur Entwicklung von neuen Therapiestrategien leisten.

Neben der Fehlhaltung des Kopfes findet man auch neuropsychologische Defizite, eine gestörte visuell räumliche Wahrnehmung und Orientierung sowie abnorme Augenbewegungen. Die pathophysiologischen Grundlagen dieser Erkrankung sind zur Zeit noch weitgehend unbekannt, als Arbeitshypothese wird derzeit eine Funktionsstörung im Bereich der Basalganglien diskutiert. Aufgrund der unterschiedlichen Symptomatik muss die Beteiligung weiterer Hirnstrukturen außer den Basalganglien vermutet werden. Zur Identifizierung dieser Areale soll eine Messung des regionalen Glukosestoffwechsels beitragen. Neben der Messung des Glukosestoffwechsels mittels [<sup>18</sup>F]FDG-PET wurden auch Untersuchungen der langsamen Augenfolgebewegungen sowie neuropsychologische Testverfahren durchgeführt. Die Messung der regionalen Glukoseverbrauchsrate des Gehirnes erfolgte nach Injektion von [<sup>18</sup>F]FDG. Nach Berechnung von Glukoseverbrauchsbildern wurden diese mit einem speziellen Verfahren räumlich normalisiert um einen Vergleich zwischen den Ergebnissen unterschiedlicher untersuchter Patienten möglich zu machen. Die Korrelation mit den Daten der langsamen Augenfolgebewegungen und den neuropsychologischen Testverfahren erfolgte über eine statistische Analyse der dreidimensionalen Bilddaten (SPM = statistical parametric mapping). Als Ergebnis fanden sich Hinweise auf Fehlfunktionen bestimmter Hirnareale bei Patienten



mit idiopathischem Torticollis. Bei ca. 70% der Patienten bestand eine Störung des Ablaufes der langsamen Augenfolgebewegungen. Die Korrelation mit den Bilddaten des regionalen Glukosestoffwechsels ergab einen erhöhten Glukosemetabolismus im Bereich der höheren Sehrinde. Weitere Erhöhungen des Glukosemetabolismus fanden sich im Bereich des Kleinhirns in Korrelation zu anderen Teilaspekten der gestörten Kontrolle der Augenbewegungen (Abbildung 8).

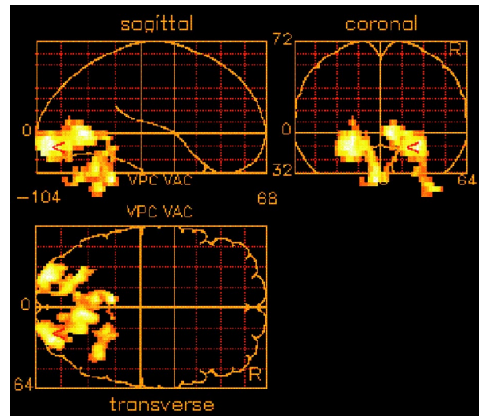
Bei den neuropsychologischen Tests ergaben sich signifikante Korrelationen hinsichtlich der Einschränkung der Konzentrationsfähigkeit und visuellen Differenzierungsleistung mit dem Stoffwechsel des unteren Stirnhirns (Abbildung 9). Weitere Veränderungen des Glukosestoffwechsels fanden sich in der Sehrinde sowie dem supplementär motorischem Cortex, dem linken Thalamus sowie dem Mittelhirn verknüpft mit einer Beeinträchtigung der Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistung.

Diese Ergebnisse deuten auf eine komplexe Störung mit einer Beteiligung unterschiedlicher Hirnareale für die Ausführung motorischer Abläufe hin. Zusätzlich ist eine Beeinträchtigung bei Patienten mit idiopathischen Torticollis auch in Bereichen der räumlichen Wahrnehmung und Orientierung wahrscheinlich. Vor diesem Hintergrund erscheint die Arbeitshypothese einer Basalganglienstörung revisionsbedürftig.

### Optimierung der Behandlungsdauer depressiver Erkrankungen mittels funktioneller Stoffwechselfmessungen mit PET

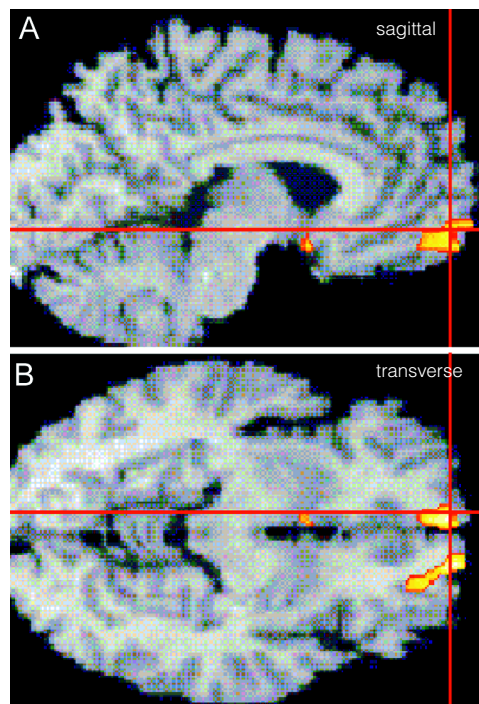
Von depressiven Erkrankungen sind in Deutschland zwischen 8 und 11 Millionen Menschen betroffen. Sie erscheint in vielen Formen und ist daher oft nur schwer zu erkennen. Deshalb wird häufig beobachtet, dass Patienten sich schon wochenlang unwohl fühlen, ohne dass sie begreifen, warum und worunter sie leiden. Wenn eine Depression ohne einen erkennbaren Einfluss auftritt, hat sie ihre Ursache wahrscheinlich im Inneren der erkrankten Person und wird endogene Depression genannt. Bei der endogenen Depression spielen nach heutigem Wissensstand Beeinträchtigungen der Stoffwechselforgänge im Gehirn eine wichtige Rolle. Die Botenstoffe können ihre Aufgabe während der akuten Depression nicht mehr voll erfüllen.

In ihrem Stoffwechsel gestörte Hirnregionen verbrauchen weniger Energie (Glukose) und



**Abb. 8**

Darstellung der Hirnstrukturen bei Patienten mit idiopathischem Torticollis, die einen vermehrten Glukosestoffwechsel bei gestörten Augenbewegungen aufweisen. Die Beteiligung Sehrinde und Kleinhirn ist deutlich zu erkennen.



**Abb. 9**

Darstellung des gesteigerten Glukosestoffwechsels (gelb) im Bereich des supraorbitalen frontalen Cortex als physiologisches Korrelat der Störung der Konzentrationsfähigkeit und visuellen Differenzierungsleistung bei Patienten mit idiopathischem Torticollis. Überlagerung der Areale auf ein kernspintomographisches Bild (A = vertikaler Längsschnitt des Gehirns, B = horizontaler Längsschnitt), vgl. Abb. 8.

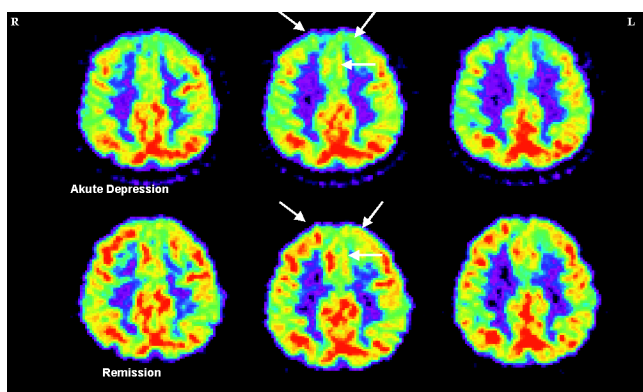
zeigen daher in der regionalen Glukosestoffwechselfmessung mittels [ $^{18}$ F]FDG-PET zu Beginn der akuten Erkrankungsphase regionale Verminderungen. Bei Patienten, die von ihrer Depression vollständig genesen sind (= Remission), bilden sich die Stoffwechselstörungen wieder zurück.

Die Schwierigkeit bei der Behandlung der endogenen Depression ergibt sich daraus, dass durch die Einnahme moderner Antidepressiva Patienten bereits nach 8-12 Wochen klinisch genesen können, während die Depression und die damit verbundene Stoffwechselstörung durchschnittlich 8 Monate fortbesteht (biologische Krankheitsaktivität). Werden die Antidepressiva vor Abklingen der biologischen Krankheitsaktivität abgesetzt, so ist die Gefahr

eines Erkrankungsrückfalls groß. Es wird daher bei jedem Patienten von der längsten Erkrankungsdauer ausgegangen, und eine Erhaltungstherapie über 12 bis 18 Monate empfohlen. Das bedeutet für den einzelnen Patienten auch, dass die mit den Antidepressiva verbundenen Nebenwirkungen über diesen Zeitraum weiter toleriert werden müssen.

Um die biologische Krankheitsaktivität zu überprüfen wurden Patienten, die an einer endogenen Depression litten, in der akuten Erkrankungsphase einer ersten PET mit [<sup>18</sup>F]FDG zur Messung des Glukosestoffwechsels unterzogen. Nach 12 Wochen klinischen Wohlbefindens wurde eine zweite PET-Untersuchung mit gleicher Methodik durchgeführt.

In der Phase der akuten Depression fand sich eine Minderung des Stoffwechsels in der frontalen Hirnrinde und benachbarten Strukturen des limbischen Systems. Weiterhin fand sich bei einzelnen Patienten eine Stoffwechselverminderung im Schläfenhirn und dem Scheitellappen. Bei Patienten, bei denen bereits die Verlaufskontrolle durchgeführt worden war, fand sich bei der Mehrzahl eine Normalisierung des Stoffwechsel bei klinischen Zeichen der Remission als Ausdruck einer auch bereits biologisch eingetretenen Normalisierung (Abbildung 10). Bei einzelnen Patienten kam es zu keiner Normalisierung des Hirnstoffwechsels trotz klinischer Remission unter laufender Medikation, was möglicherweise als Ausdruck einer noch bestehenden Krankheitsaktivität zu werten ist und ein Rezidiv nach Absetzen der Medikamente vermuten ließe.



**Abb. 10**  
Darstellung des Glukosestoffwechsels des Gehirns eines Patienten mit endogener Depression. Die obere Zeile zeigt horizontale Längsschnitte des Glukoseverbrauchs in der akuten Krankheitsphase, die untere Zeile identische Hirnschnitte in klinischer Remission. Auffällig ist in der akuten Phase eine Verminderung des Glukosestoffwechsels in Bereichen des Stirnhirns und des limbischen Systems (Pfeile), welche sich als Ausdruck der biologischen Remission normalisiert.

## Vitalität und Funktionsstatus des Gehirns beim apallischen Syndrom

Das apallische Syndrom, das sog. „Wach-Koma“ ist Ausdruck einer schweren Hirnschädigung. Der Patient befindet sich dabei in einem komatösen Zustand, bei dem er zwar einen Schlaf-Wach-Rhythmus aufweist, jedoch keinen Kontakt zur Umwelt aufnimmt. Ursache einer solchen Hirnschädigung können z.B. schwere Schädel-Hirn-Traumata oder Massenblutungen im Bereich des Gehirns sein. Für viele Patienten ist dieser Zustand irreversibel. Ein Teil dieser Patienten kann jedoch durch intensive Rehabilitationsmaßnahmen klinisch deutlich gebessert werden. Da dies bisher aber nicht vorhersagbar ist, soll durch die Messung des regionalen Glukosestoffwechsels das Ausmaß und die Verteilung der Einschränkung der Hirnfunktion charakterisiert werden, um so besser die pathophysiologischen Abläufe zu verstehen. Um das funktionelle Ausmaß der Hirnschädigung bei Patienten mit apallischem Syndrom zu charakterisieren, wurde bei Patienten die Hirndurchblutung und der Glukosemetabolismus des Gehirns mit Hilfe der nuklearmedizinischen Methoden der Single-Photon-Emission-Tomography (SPECT) bzw. der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) bestimmt. Nach Rekonstruktion der Bilddaten wurden die PET- und SPECT-Datensätze überlagert. Die weitere Datenanalyse der PET- und SPECT-Untersuchungen erfolgte einerseits qualitativ bezüglich der Verteilung von Durchblutung und Glukosestoffwechsel, andererseits quantitativ auf der Basis definierter „Regions of interest“ (ROI).

Alle untersuchten Patienten zeigten im PET ausgeprägte Defekte sowie eine hochgradige Verminderung des cerebralen Glukosestoffwechsels auch in primär nicht geschädigten Hirnregionen. Diese Minderungen sind in der Hirnrinde und den zentralen Hirnteilen stärker ausgeprägt als im Hirnstamm und im Kleinhirnwurm. Es stellte sich ferner heraus, dass der Stoffwechsel in der Hirnrinde stärker gestört ist als die Durchblutung. Keine Unterschiede zeigten sich dagegen in tiefen Hirnstrukturen, Hirnstamm und Kleinhirnwurm. In Läsionen und – deutlicher ausgeprägt – in deren Randbereichen zeigen sich höhere Durchblutungs- als Stoffwechselwerte („Luxusdurchblutung“) (Abbildung 11).

Da normalerweise eine enge Kopplung zwischen Hirndurchblutung und Hirnstoffwechsel vorliegt, zeigen diese Daten, dass bei diesen

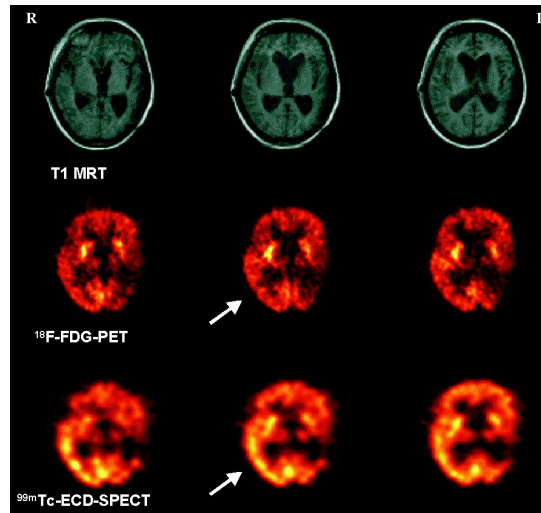
Patienten in der Hirnrinde und dem Kleinhirn eine Entkopplung von Metabolismus und Durchblutung stattgefunden hat. Aus diesem Grunde erscheint eine Vitalitätsdiagnostik, d.h. eine Beurteilung erholungsfähigen Hirngewebes mittels der Messung des Glukoseverbrauchs mit der Positronen-Emissions-Tomographie verlässlicher als mit der Hirndurchblutungsuntersuchung mittels SPECT. Hinsichtlich der prognostischen Aussagekraft der Untersuchung sind die Verlaufsbeobachtungen noch nicht abgeschlossen.

## Zusammenfassung

Die Positronen-Emissions-Tomographie erlaubt mit Hilfe der Radiotracer-technik eine quantitative Erfassung von Stoffwechselwerten und biochemischen Parametern, die sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der klinischen Forschung Erkenntnisse liefern, die mit anderen Verfahren nicht gewonnen werden können. Grundlage für eine erfolgreiche wissenschaftliche Anwendung des Verfahrens ist eine zuverlässige Verfügbarkeit von Radiodiagnostika mit einem hohen Qualitätsstandard für die Anwendung am Menschen. Für die klinische Forschung ist weiterhin eine enge Kooperation mit klinischen Partnern unabdingbar. Aus dieser Erkenntnis heraus wurde das PET-Zentrum Rossendorf als Kooperation zwischen der TU-Dresden und dem Forschungszentrum Rossendorf gegründet und nimmt diesbezüglich seine Aufgaben seit Ende 1997 wahr.

Gegenwärtige Forschungsprojekte befassen sich im neurowissenschaftlichen Bereich schwerpunktmäßig mit der Charakterisierung gestörter Hirnfunktionen. Dazu wurden im Bereich der Grundlagenforschung tierexperimentelle Arbeiten zur Vertiefung des Verständnisses von Schädigungen des Gehirns durch Sauerstoffmangel vorgenommen. Hierbei konnten Veränderungen im Stoffwechsel spezifischer Neurotransmitter nachgewiesen werden, insbesondere konnte gezeigt werden, dass das Schlüsselenzym für die Synthese des Dopamins bei Sauerstoffmangel erhöht war.

In der klinischen Grundlagenforschung konnten bei Patienten mit idiopathischem Torticollis eine Vielzahl von Hirnzentren identifiziert werden, die an der Ausprägung der Krankheitssymptomatik ursächlich beteiligt sind. Die bisherige allgemein verbreitete Arbeitshypothese von einer weitgehend alleinigen Störung der Funktion der Basalganglien muss aufgrund der vorliegenden Ergebnisse in Frage gestellt werden.



**Abb. 11**  
23-jähriger Patient 3 Monate nach einem Schädel-Hirn-Trauma. Dargestellt sind horizontale Hirnschnitte der Kernspintomographie (oben), des regionalen cerebralen Glukosestoffwechsels gemessen mit der PET (Mitte) und der regionalen Durchblutungsverteilung gemessen mit der SPECT (unten). Auffällig ist die Diskrepanz zwischen Stoffwechsel und Durchblutung im Bereich der Hirnrinde (Pfeile).

Bei Patienten mit apallischem Syndrom wurden Untersuchungen zur Vertiefung des pathophysiologischen Verständnisses der Erkrankung und insbesondere auch des Erkrankungsverlaufes durchgeführt. Hier zeigte es sich, dass der Stoffwechsel bei diesen Patienten insgesamt erniedrigt war – auch in nicht primär geschädigten Hirnarealen. Bei einem Vergleich des regionalen Glukosestoffwechsels mit der Durchblutung erwies sich lediglich die markierte Glukose als verlässlicher Marker, um irreversibel geschädigte Hirnanteile zu erkennen.

Im Bereich der klinischen Forschung wurden Stoffwechseluntersuchungen mit markierter Glukose zur Optimierung der medikamentösen Therapie endogener depressiver Patienten durchgeführt. Hier weisen erste Ergebnisse darauf hin, dass die biologische Aktivität der Erkrankung diejenige der klinischen Krankheits-symptome überdauert, was dazu führen kann, dass die Medikation zu früh abgesetzt wird und es zu einem Krankheitsrezidiv kommt. Für eine gezielte Steuerung der Behandlungsdauer mit Medikamenten kann somit die PET wichtige Hinweise über den Erkrankungs-zustand liefern. Aufbauend auf die vorgestellten Ergebnisse sollten künftig neben einer Fortführung der Untersuchungen zum Glukosestoffwechsel des Gehirns insbesondere auch Arbeiten mit spezifischeren Tracern zur Analyse verschiedener neurofunktioneller Systeme bei neurologisch-psychiatrischen Erkrankungen durchgeführt werden.

# BAKTERIEN IN URANABFALLHALDEN UND IHRE WECHSELWIRKUNG MIT URAN

Sonja Selenska-Pobell, Jannette Wober, Sabine Kutschke, Johannes Raff, Katrin Flemming

Institut für Radiochemie

Bakterien sind die häufigsten Organismen auf der Erde. Sie leben in Gewässern und in Böden nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in großen Tiefen. Dabei besiedeln sie Nischen, in denen Leben für Pflanzen, Tiere und Insekten unmöglich ist, wie z. B. heiße Quellen, das antarktische Eis, alkalische Seen, saure Flüssigkeiten, Salzseen, Wüsten, usw. Bakterien können auch in Umgebungen leben, die mit Radionukliden und Schwermetallen kontaminiert sind. Es konnte in wissenschaftlichen Untersuchungen gezeigt werden, dass das Ausmaß der Kontamination, selbst in stark verseuchten Böden oder Wasserproben, keinen negativen Einfluss auf Bakterien hat, die in diesen Bereichen natürlich vorkommen; sie passen sich den extremen Umweltbedingungen an. Mehr noch, viele Bakterienarten sind involviert in Bio-Transformationsprozesse von giftigen Metallen.

Bakterien können in vielfältiger Weise nicht nur mit organischen Stoffen sondern auch mit Schwermetallen wechselwirken. Einige von ihnen sind in der Lage, elementare Metalle oder Metallsulfide durch Oxidation in eine lösliche Form zu überführen. Andere Arten sind dagegen an der Reduktion und Präzipitation von Radionukliden, wie z. B. Uran, beteiligt. Ebenso sind viele Bakterien in der Lage, Kobalt, Molybdän, Blei, Quecksilber, Kupfer, Mangan, Aluminium, Cadmium, Gallium, Barium und andere giftige Metalle zu akkumulieren und diese dann aus den kontaminierten Umgebungen herauszutransportieren.

Durch diese besonderen Eigenschaften der Bakterien ergeben sich Anknüpfungspunkte und Lösungen für ein, besonders für die Region dringliches Problem: Hier, wie in vielen europäischen Ländern wurde oder wird z.T. noch intensiv Uranbergbau betrieben. Durch diesen Uranbergbau und die Uranproduktion sind viele Gebiete hochgradig mit Schwermetallen und Radionukliden belastet. Bei den dortigen Uranabfallhalden gibt es Böden, Wässer und Sedimente, die mit Uran und anderen gesundheits-



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

gefährdenden Metallen wie Selen, Molybdän, Arsen, Cadmium, Chrom, Quecksilber, Blei, Kupfer, Nickel, Zink u.ä. kontaminiert sind.

Orte, an denen die Gewinnung des Urans aus dem Erz betrieben wurde, weisen außerdem erhebliche Mengen Thorium, Radium und Polonium z. B. in den Absetzbecken auf. Diese gefährlichen Abfälle stellen ein großes Umweltproblem dar. Besonders schwerwiegend ist dieses in Ostdeutschland als Folge des intensiven Uranerzbergbaus in den Jahren 1945 bis 1990. Die Förderung von ca. 220.000t Uran – 60% des überhaupt in dieser Zeit von der Sowjetunion verwendeten Materials – war mit der Bildung umfangreicher Grubensysteme, der Anschüttung riesiger Gesteinshalden und der Installation großflächiger Absetzbecken für die Gewinnung und Aufbereitung des Urans verbunden. Daraus resultieren Verunreinigungen von Böden, Wässern und Sedimenten mit Uran und seinen natürlichen Zerfallsprodukten wie Radium oder anderen im Erz enthaltenen Schwermetallen.

## Möglichkeiten der Reinigung schwermetall-belasteter Umgebungen

Die Technologien zur Reinigung von schwermetall-belasteten Böden und Wässern sind äußerst vielfältig und werden im industriellen Maßstab betrieben. Zu den konventionellen chemischen und physikalischen Methoden gehören Waschung mit Lösungsmitteln, Ausfällung, Oxidation und Reduktion, Ionenaustausch und Filtration. Diese Verfahren sind auf Grund des hohen Verbrauchs von Chemikalien, Lösungsmitteln und Energie sehr teuer. Sie dürften auch bei der Anwendung zur Dekontamination von uranhaltigen Abfällen unter natürlichen Bedingungen ineffektiv sein, da diese Abfälle sehr komplex zusammengesetzt sind. Die dort herrschenden komplizierten biotischen und abiotischen Umweltfaktoren sind aber kein limitierender Faktor für die Aktivität des natürlichen bakteriellen Lebens in diesen Umgebungen, da sich die Bakterien sehr gut den Umgebungsbedingungen angepasst haben.

Ausgehend vom gezielten Einsatz von Mikroorganismen bei der Gewinnung von Metallen aus sulfidischen Erzen in den 50er Jahren, wurden Verfahren zur Gewinnung von Kupfer und Uran mittels chemolithotropher Bakterien der Gattung *Thiobacillus* auch aus sehr schwach angereicherten Erzen, den sogenannten Armerzen, ausgearbeitet. Neben der Gewinnung von Metallen aus Armerzen ist ein zunehmendes Interesse auf die Entwicklung und Anwendung von mikrobiologischen Verfahren zur Reinigung kontaminierter Gewässer und Böden gerichtet. Die Entwicklung preiswerter und effektiver mikrobieller Techniken zur Entfernung von Metallen aus belasteten Abwässern, Sedimenten und Böden erfordert aber eine intensive Analyse der Zusammensetzungen und der Aktivitäten der natürlichen Bakteriengemeinschaften in den kontaminierten Abfällen.

### Chemolithotrophe Bakterien

Sie assimilieren  $\text{CO}_2$  durch den sogenannten Calvin-Cyclus, einem Stoffwechselzyklus, in dessen Verlauf  $\text{CO}_2$  mit Hilfe von ATP und NADPH in Zucker umgewandelt wird. Die Bakterien wachsen auf mineralischen Medien und erschließen ihre Energie und Reduktionsäquivalente durch die Oxidation anorganischer Verbindungen.

### Ziel der mikrobiologischen Forschung im Institut für Radiochemie

Hauptziel unserer Forschung ist es, neben zu den ebenfalls im Institut untersuchten physikalischen und chemischen Mechanismen,

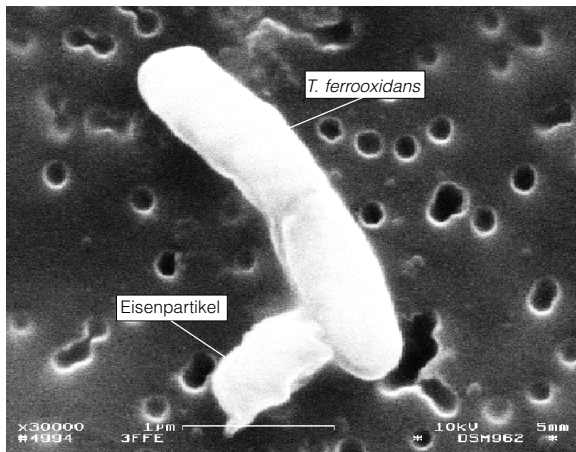
auch zur Aufklärung der Wechselwirkungen von Bakterien mit Schwermetallen und zum Einfluss von Bakterien auf das Transportverhalten von Radionukliden und anderen Schwermetallen beizutragen. Es ist zu analysieren, welche Bakterien so hervorragend angepasst an die extremen Lebensbedingungen sind, dass sie dort effektiv „leben und arbeiten“ können. Die biochemischen Mechanismen der mikrobiellen Akkumulation und Reduktion von Schwermetallen sind zu klären, mit denen diese Bakterien die „Dekontaminationsarbeit“ leisten und es ist von größtem Interesse, herauszufinden, welche Gene in diese Vorgänge involviert sind. Letzteres besitzt große Bedeutung, weil damit den Wissenschaftlern nicht nur die Möglichkeit gegeben wird, mehr über die Mechanismen der Metallaufnahme und -reduktion durch Bakterien zu erfahren, sondern auch durch Manipulation der dafür verantwortlichen Gene Bakterienstämme zu konstruieren, die effektiv in Technologien für die Bioremediation von Uranabfällen eingesetzt werden können. Vor dem Hintergrund der aus dem ehemaligen Uranerzbergbau in Sachsen und Thüringen stammenden Altlasten, liegt der Schwerpunkt unserer Arbeiten darauf, die Wechselwirkungen mit Uran von Bakterienstämmen zu erforschen, die aus sächsischen Halden, Gruben und Tailings isoliert wurden. Voraussetzung für diese Forschungen ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Mikrobiologen, Biochemikern, Radiochemikern, Physikern und Geologen. Im Folgenden sollen die Arbeiten der Gruppe Molekulare Mikrobiologie im Institut für Radiochemie zur Diversität und Aktivität von Bakterien in verschiedenen Uranerzbergbau-Altlasten in Sachsen vorgestellt werden.

### Arbeiten zur bakteriellen Diversität und zur Wechselwirkung von Bakterien mit Uran

Hierzu wurden Proben aus Sedimenten, Böden oder Wässern der Haberlandhalde in der Nähe von Johanngeorgenstadt, einem Absetzbecken nahe der Steinsee-Deponie 1 und aus Tailings in Gittersee/Coschütz und Schlemma/Alberoda entnommen und mit modernen molekularbiologischen Methoden, wie z. B. der *Ribosomal Intergenic Spacer Amplification* (RISA) sowie der *16S ribosomal DNA (rDNA) Amplification* und *Sequenzanalyse*, der *Pulsed-field Gel Electrophoresis* (PFGE), *Random Amplified Polymorphic DNA* (RAPD), *Repetitive*

Primer Amplified Polymorphic DNA (rep-APD), und der *Time-resolved Laser Fluorescence Spectroscopy* (TRLFS) untersucht. Wir fanden in den untersuchten Proben eine extrem hohe bakterielle Diversität. Im Einzelnen konnte die Präsenz von dominierenden bakteriellen Gruppen der Gattungen *Thiobacillus*, *Leptospirillum*, *Desulfovibrio*, *Bacillus* und *Pseudomonas* demonstriert werden.

**Abb. 2**  
Raster-  
elektronenmikroskop-  
aufnahme eines  
*Thiobacillus*  
*ferrooxidans* mit  
einem Eisenpartikel



### *Thiobacillus ferrooxidans*

Eine dieser Gruppen gehört zur Art *Thiobacillus ferrooxidans*. Die Stämme sind chemolithoautotroph, sie können Uran(IV) und Eisen(II) wie auch verschiedene Metallsulfide aus natürlichen Mineralien oxidieren. Letzteres ist als sogenanntes „Bioleaching“ bekannt, also ein Auslaugen und Lösen mit biologischen Methoden. Nach heutiger Kenntnis sind nur diese Bakterien in der Lage, Uran sogar aus sauren

Medien mit einem pH-Wert bis zu 1,5 zu akkumulieren. Bisher fanden wir drei verschiedene Typen dieser Art, mit geringen Unterschieden in ihren 16S-rRNA Genen. Damit liegen erstmals Hinweise auf eine Mikrodiversität innerhalb sehr eng verwandter natürlicher *T. ferrooxidans*-Isolate vor. Wir vermuten, dass die beobachtete Mikrodiversität die genetische Adaptation der untersuchten Stämme an die Schwermetallkonzentration ihrer natürlichen Umgebung widerspiegelt.

#### rDNA

DNA-Abschnitte auf einem Genom, die die Gene für die ribosomalen RNAs (rRNA) enthalten.

#### 16S rDNA

Gen der 16S rRNA, das die Verwandtschaft zwischen Bakterien widerspiegelt.

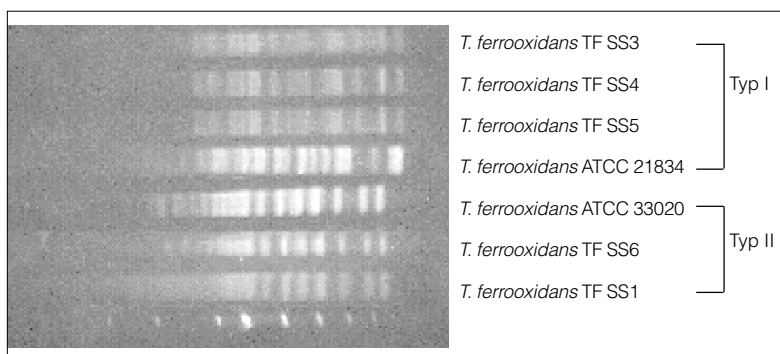
#### Mikrodiversität

Eine neu entdeckte Form bakterieller Diversität bei Stämmen derselben Art, die aus verschiedenen natürlichen Umgebungen isoliert wurden. Die 16S rRNA-Gene solcher Stämme besitzen spezifische kurze Sequenzabschnitte, die die Stämme unterscheiden.

Es wurden mehrere *T. ferrooxidans* Stämme, die zu zwei der oben erwähnten drei Typen gehören, aus Bodenproben der Haberlandhalde gewonnen, die unterschiedlich stark mit Schwermetallen belastet sind. Die Genomorganisation dieser zwei Gruppen von Isolaten unterscheidet sich jedoch von der Genomorganisation bereits bekannter Referenzstämmen von *Thiobacillus ferrooxidans* (siehe Abb. 3).

#### Gelelektrophorese

Eine wichtige Methode zur Auftrennung von Gemischen elektrisch geladener hochmolekularer Stoffe, besonders von Nukleinsäuren und Proteinen sowie deren Fragmenten. Diese wandern dabei innerhalb eines Gels unter der Wirkung eines elektrischen Feldes in Abhängigkeit von der Ladungszahl und Molekülmasse unterschiedlich schnell zu den jeweiligen Polen.

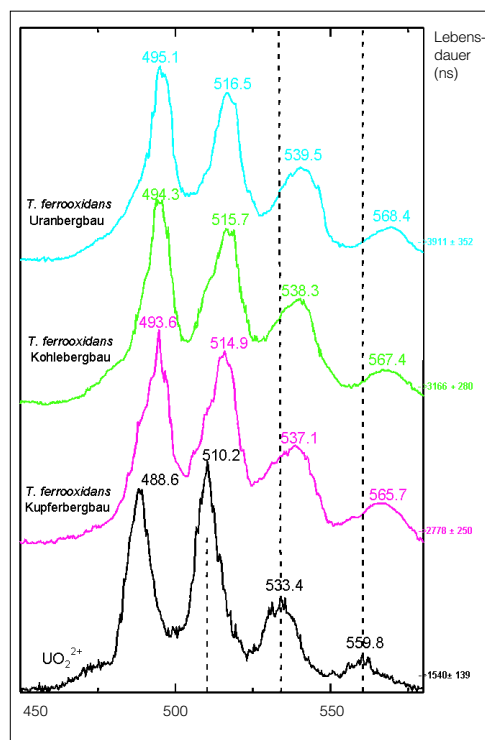


**Abb. 3**  
Durch Puls-Feld-Gelelektrophorese erhaltene genomische Fingerprints; Genomorganisation von *T. ferrooxidans*-Referenzstämmen (ATCC) von Typ I und Typ II sowie von den *T. ferrooxidans*-Isolaten (TF SS) aus der Haberlandhalde, die nach der 16S rDNA dem Typ I und II zugeordnet sind. Mittels Gelelektrophorese wurden die Genomfragmente aufgetrennt. Es sind deutlich die unterschiedlichen Bandenmuster für beide Typen erkennbar.

Neben den genetischen Unterschieden zeigen die Stämme der Gruppe, die aus der am stärksten kontaminierten Probe stammt, eine Toleranz gegenüber Uranylionen-Konzentrationen, die für die Isolate der zweiten Gruppe schon toxisch sind. Auch wird in den besonders urantoleranten Stämmen der Stoffwechsel der Bakterien beeinflusst. In Anwesenheit von Uranylionen wird die Synthese von drei Proteinen beeinflusst. Die Untersuchung der Gene, die für die Synthese dieser Proteine verantwortlich sind, ist von grundlegender Bedeutung und würde helfen, die Ursachen der Toleranz sowie auch anderer Wechselwirkungen mit Schwermetallen zu verstehen. Erst durch diese Kenntnisse kann man gezielte Strategien zur Züchtung von Bakterien entwickeln, die durch ihre erhöhte Toleranz und/oder Metall-

bindungskapazität zur Sanierung z.B. im Uranbergbau beitragen können.

Die Untersuchungen des dritten *T. ferrooxidans* Typs, der aus einer noch extremer mit Schwermetallen kontaminierten Sedimentprobe der Deponie B1/Weiße Elster stammt, stehen erst am Anfang. Da Schwermetalle in der Natur in unterschiedlichen Oxidationsstufen auftreten können, wurde auch die Fähigkeit der *T. ferrooxidans* Uranbergbauisolate, mit Uran in der Oxidationsstufe (VI) in Wechselwirkung zu treten, untersucht. Es konnte dabei festgestellt werden, dass diese Isolate deutlich größere Mengen von Uran(VI) akkumulieren können als *T. ferrooxidans*-Stämme, die aus anderen Umgebungen stammen. Mittels zeitaufgelöster Laserfluoreszenzspektroskopie (TRLFS) konnte außerdem gezeigt werden, dass eines der Uranbergbauisolate Uran(VI) deutlich stärker komplexiert – also Uran deutlich stärker bindet – als die Referenzstämme (siehe Abb. 4). Wie man in Abb. 4 sehen kann, tritt bei den Fluoreszenzspektren der Uranyl-*T. ferrooxidans*-Komplexe im Vergleich zu den Spektren der Uranyl-aquaionen eine „Rotverschiebung“ der Fluoreszenzbanden sowie eine deutliche Zunahme der Fluoreszenzlebensdauer auf; dieses Ergebnis weist auf die Bildung von starken „inner-sphere“-Uran-Komplexen an den Bakterien hin. Die stärkste Rotverschiebung des Fluoreszenzspektrums wurde für den Fall des



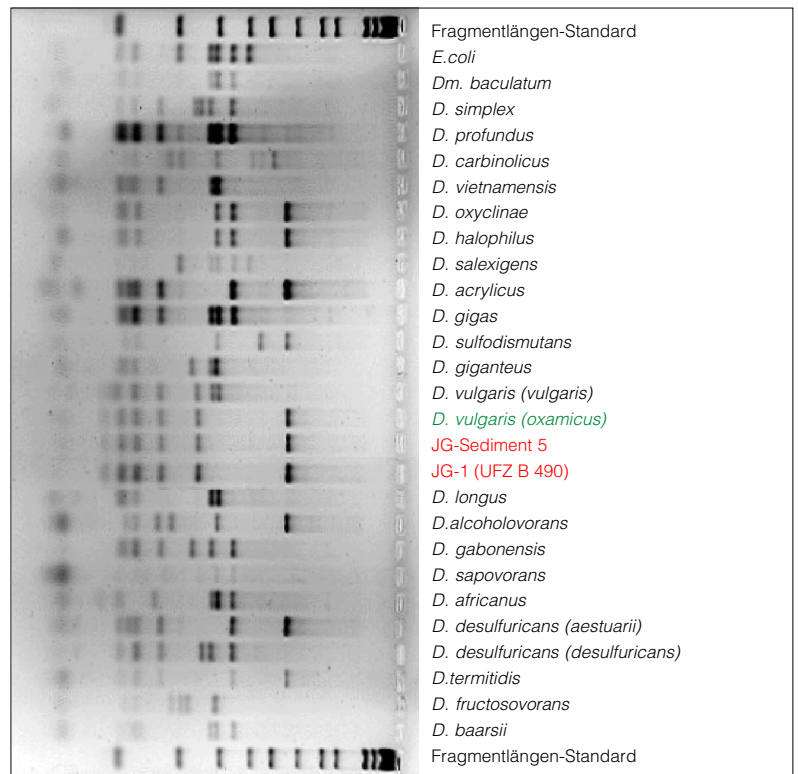
Uranyl-Komplexes mit dem Uranbergbauisolat beobachtet. Dieses Ergebnis bestätigt, dass dieser Komplex am stärksten ist.

### Desulfovibrio

Eine zweite Gruppe der analysierten Isolate aus uranhaltigen Abfällen sind Bakterien, die zur Gattung *Desulfovibrio* gehören. Diese sulfat-reduzierenden Bakterien können das lösliche Uran(VI) zu unlöslichem Uran(IV) reduzieren und damit Uran immobilisieren. Zur Identifizierung dieser *Desulfovibrio*-Haldenisolate wurden sie anhand sogenannter phylogenetischer Fingerprints (16S-rDNA RFLP) mit bereits bekannten *Desulfovibrio*-Referenzstämmen verglichen (siehe Abb. 5).

### RFLP

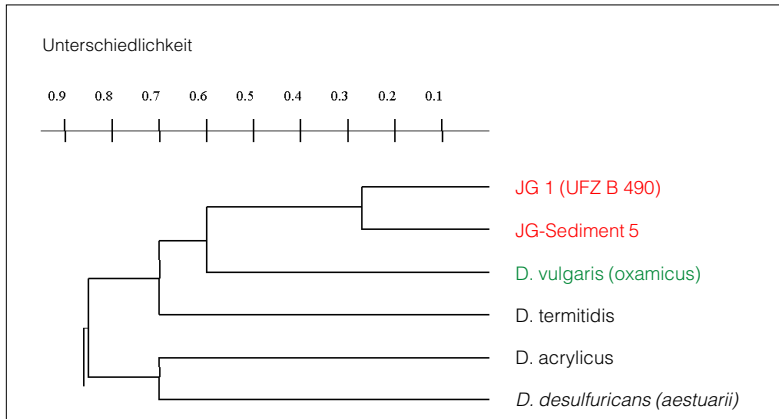
Abk. für Restriktionsfragmentlängenpolymorphismus, bezeichnet den Umstand, dass vererbare, lokal auftretende Sequenzveränderungen in einer DNA zu Veränderungen in dem ursprünglichen Muster von Restriktionsfragmenten bei Verdau („Schneiden“) dieser DNA mit Restriktionsenzymen führen können. Die Analysen der Änderungen im Spaltungsmuster werden durch vergleichende Gelelektrophoresen durchgeführt.



**Abb. 5** 16S rDNA Fingerprints der *Desulfovibrio*-Referenzstämmen und der Isolate der Haberlandhalde (rot markiert) JG-1 (UFZ B490) und JG-Sediment 5. Es sind deutlich die identischen Bandenmuster der Haldenstämmen und *D. vulgaris (oxamicus)* (grün markiert) erkennbar, die sich ergeben, wenn die 16S rDNA-Fragmente mit der Restriktionsendonuclease *Bst*UI „geschnitten“ wurden.

**Abb. 4** Zeitaufgelöste Laserfluoreszenzspektroskopie von Uran(VI) in Wasser ( $UO_2^{2+}$ -Uranyl-aquaionen als Referenz) bzw. von U(VI) gebunden an *T. ferrooxidans*-Stämme aus verschiedenen Bergbauminen. Für die gebildeten Urankomplexe an den Bakterien ist eine Verschiebung der Peaks zu größeren Wellenlängen (Rotverschiebung) und eine Erhöhung der Lebensdauer, d.h. die Fluoreszenz hält länger an, zu beobachten. Beides ist ein Hinweis auf die Zunahme der Stärke der Urankomplexe.

Bisher konnten wir zwei *Desulfovibrio*-Isolate, die aus verschiedenen Sedimenten der Haberlandhalde stammen, als *Desulfovibrio vulgaris* (*oxamicus*) klassifizieren (siehe Abb. 6) und ihre Uran-Reduktionsfähigkeit bestätigen.



**Abb. 6**  
Dendrogramm zum Nachweis der Verwandtschaft von klassifizierten *Desulfovibrio*-Isolaten (rot markiert) aus der Haberlandhalde mit ausgewählten *Desulfovibrio*-Referenzstämmen

Weitere 15 *Desulfovibrio*-Isolate, die aus Bodenproben der Haberlandhalde gewonnen wurden, zeigten in unseren Untersuchungen keine enge Verwandtschaft zu den ebenfalls

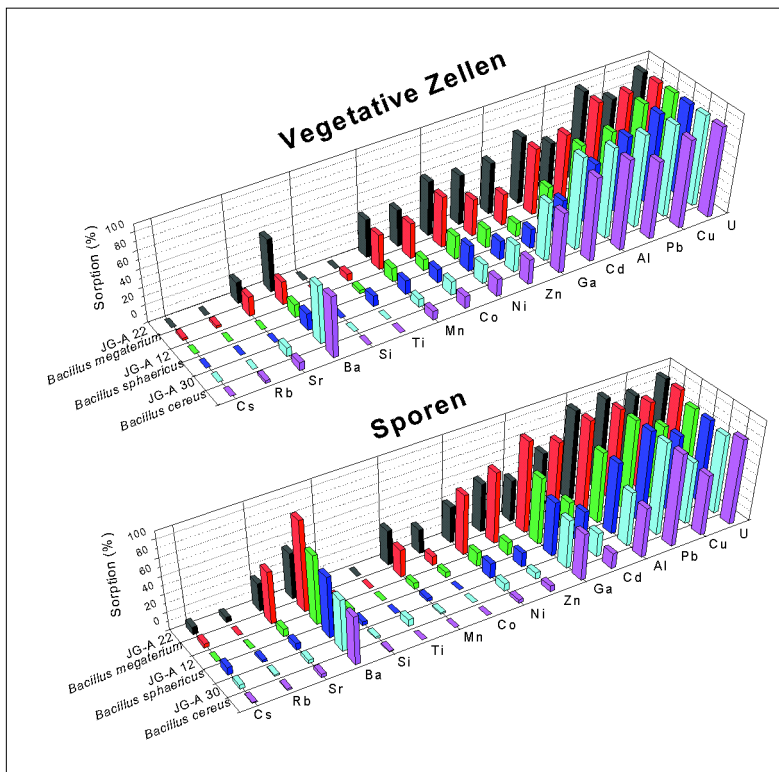
untersuchten *Desulfovibrio*-Referenzstämmen. Es konnten aber zwei dominierende Gruppen von *Desulfovibrio*-Stämmen unterschieden werden. Mittels detaillierter Analyse der DNA-Sequenzen, bei der die Bausteine der DNA „gelesen“ werden, der 16S rDNA einer dieser Gruppen wurde eine nahe Verwandtschaft zur Art *Desulfovibrio thermosapovorans* beobachtet (96 % Identität der entsprechenden 16S rRNA-Gene). Die weitere Analyse zur Klassifizierung der *Desulfovibrio*-Stämme aus der Haberlandhalde wird mittels Sequenzierung des 16S-rRNA-Gens durchgeführt.

### Bacillus

Die dritte dominierende Gruppe von Bakterien, die aus uranhaltigen Abfällen stammen, gehört zur Gattung *Bacillus*. Wir konnten drei dieser Isolate als *B. cereus*, *B. megaterium* und *B. sphaericus* klassifizieren. Diese Stämme sind in der Lage, selektiv verschiedene Schwermetalle aus Sickerwässern der Haberlandhalde zu akkumulieren (siehe Abb. 7). Damit ergeben sich mögliche Ansatzpunkte für die Nutzung zur Reinigung solch belasteter Wässer auf biologischem Weg.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die *Bacillus*-Stämme bei pH 4,8 – ein Wert, der sehr oft in Uranabfallhalden vorliegt – deutlich größere Mengen Uran binden als die oben beschriebenen *T. ferrooxidans*-Stämme. Allerdings bilden die *Bacillus*-Stämme schwächere Urankomplexe als die *T. ferrooxidans*-Stämme, wie mittels *Time-resolved Laser Fluorescence Spectroscopy* nachgewiesen werden konnte. Durch diese schwache Bindung sind diese Bakterien besonders für biotechnische Verfahren geeignet, bei denen z.B. Wasser gereinigt werden sollen, da sich die Metallkomplexe leichter wieder ablösen lassen.

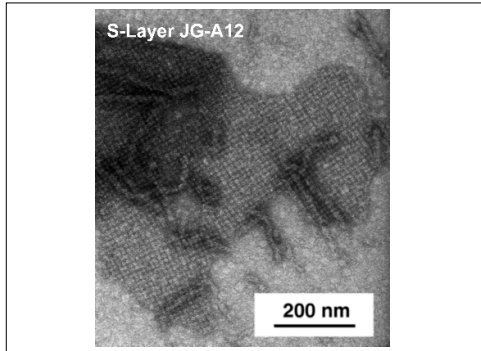
Außerdem haben wir gefunden, dass ein *Bacillus*-Stamm aus der Haberlandhalde ein neuartiges S-Layer-Protein besitzt (siehe Abb. 8). S-Layer sind poröse kristalline Proteinmembranen mit einer Dicke von 5 bis 15 nm. Sie bilden die äußerste Schicht der Bakterien-Zell-



**Abb. 7**  
Selektive Bioakkumulation von Schwermetallen im Grundwasser der Haberlandhalde an drei *Bacillus*-Stämmen dieser Halde sowie an den jeweiligen Referenzstämmen (erhalten durch ICP-Massenspektroskopie)



wand und geben den Mikroorganismen einen selektiven Vorteil, da sie als Schutzhülle, Molekularsieb, Ionenfalle usw. fungieren können. Sie stellen ein großes Potential für Neuentwicklungen in der Biotechnologie, der Medizin und der Nanotechnologie dar.



**Abb. 8**  
Elektronenmikroskopische Aufnahme des S-Layers des Haldenisolats *B. sphaericus* JG-A12

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die von uns aus uranhaltigen Abfällen isolierten und dann analysierten Bakterien auf Grund der hervorragenden Anpassung an ihre sehr komplexen geologischen, chemischen und biologischen Umweltbedingungen von großer Bedeutung für die Entwicklung von Technologien zur Bioremediation uranbelasteter Flächen und Wässern sein können.

Mittels der eingesetzten modernsten Methoden der Mikrobiologie sowie der Spektroskopie sind zukünftig weitere entscheidende Beiträge zur Aufklärung der Wechselwirkung von Bakterien mit Uran und anderen Radionukliden zu erwarten.

Wir danken Herrn Prof. G. Bernhard und Herrn Prof. H. Nitsche für viele weiterführende Diskussionen und die Unterstützung unserer Arbeiten, sowie Herrn Dr. G. Geipel für die TRLFS- und Frau Dr. W. Wiesener für die ICP-Messungen.

# IONEN-NITRIERUNG VON ALUMINIUMWERKSTOFFEN

S. Parascandola, E. Richter, W. Möller

Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

## Aluminiumwerkstoffe / Warum Nitrierung?

Aluminiumwerkstoffe haben eine breite industrielle Anwendung gefunden. Sie werden bevorzugt im Kraftfahrzeug- und Flugzeugbau eingesetzt. Im Wettbewerb mit anderen Konstruktionswerkstoffen zeichnen sie sich insbesondere durch ihr günstiges Verhältnis von Festigkeitseigenschaften und Dichte und den daraus resultierenden geringen Bauteilgewichten aus. Aluminiumwerkstoffe sind aber relativ weich und zeigen wenig Widerstand gegen Verschleiß und Korrosion. Durch diese ungünstigen Eigenschaften, die durch die Oberfläche und die Randschicht eines Bauteils bestimmt werden, wird ihr Anwendungspotential beträchtlich eingeschränkt. Eine Modifikation der Randschicht in Hinblick auf eine Verbesserung der Härte, des Verschleißverhaltens und der Korrosionsbeständigkeit ist daher von großem Interesse und wird seitens der Forschung intensiv bearbeitet. Eine erfolversprechende Möglichkeit zur Härtesteigerung und zur Verschleißminderung wird in der Nitrierung von Aluminiumwerkstoffen gesehen.

von Aluminiumwerkstoffen ein technisches Problem. Einer der Gründe liegt in der Existenz einer dünnen Oxidschicht (einige nm), die sich an Luft auf jeder Aluminiumoberfläche sofort ausbildet. Diese Aluminiumoxidschicht ist chemisch sehr stabil und wirkt als Barriere für die Diffusion von Stickstoff. Aluminiumwerkstoffe können daher mit kommerziell etablierten Nitrierverfahren (z.B. Badnitrieren, Gasnitrieren, Plasmanitrieren), bei denen der Übergang des Stickstoffs aus dem Nitriermedium in die Oberfläche thermochemisch kontrolliert ist, nicht erfolgreich nitriert werden.

## Warum Ionen?

### Was ist Ionen-Nitrierung?

Wesentlich erfolversprechender sind Verfahren der Ionen-Nitrierung, bei denen der Stickstoffeintrag durch die Implantation von Stickstoff kontrolliert ist. Der Stickstoff dringt aufgrund seiner hohen Geschwindigkeit in den Aluminiumwerkstoff ein (er wird implantiert) und kann so hinter der Oxidbarriere für den eigentlichen thermisch kontrollierten Diffusionsprozess zur Verfügung gestellt werden. Energetische Ionen werden nicht nur implantiert, sondern sie können aus der Oberfläche des Werkstoffes Atome ausschlagen. Dieser Mechanismus wird als Zerstäubung oder Sputtern bezeichnet und kann zusätzlich für die erfolgreiche Nitrierung von Aluminiumwerkstoffen genutzt werden, da durch die Zerstäubung die Dicke der Oxidschicht verringert oder die Schicht völlig entfernt werden kann. Das Spektrum der Verfahren zur Ionen-Nitrierung reicht von der konventionellen Beamline-Ionenimplantation, bei der monoenergetische Ionen mit einem Teilchenbeschleuniger auf das Werkstück geschossen werden, über die Plasma-Immersion-Ionenimplantation bis hin zur Niederenergie-Ionenimplantation, bei der Ionen durch geeignete Ionenquellen erzeugt werden und mit Energien kleiner als 5 keV auf das Werkstück geschossen werden. Wichtige Parameter der Ionen-Nitrierung sind die Ionenenergie,

## Plasma-Immersion-Ionenimplantation

Bei der Plasma-Immersion-Ionenimplantation wird in einer Vakuumkammer mit Hilfe einer Plasmaquelle (ECR-Quelle, HF-Quelle, etc.) ein Plasma – für die Nitrierung ein Stickstoffplasma – erzeugt, das die gesamte Vakuumkammer ausfüllt. Das zu nitrierende Werkstück befindet sich ebenfalls in dieser Vakuumkammer und wird allseitig vom Stickstoffplasma umschlossen (Immersion). Legt man an das gegen die Vakuumkammer elektrisch isoliert angebrachte Werkstück einen negativen Hochspannungspuls, so werden die in Werkstücknähe im Plasma befindlichen positiv geladenen Stickstoffionen auf das negativ geladene Werkstück hin beschleunigt und implantiert. Die Plasma-Immersion-Ionenimplantation ist gegenüber der konventionellen Beamline-Implantation deutlich kostengünstiger und damit für eine technische Nutzung wesentlich interessanter.

## Was ist Nitrierung?

### Wie wird das Nitrierergebnis charakterisiert?

Die Nitrierung ist ein Verfahren zur Randschichtmodifikation, bei der während einer Wärmebehandlung die chemische Zusammensetzung der Randschicht durch Eindiffusion von Stickstoff gezielt verändert wird. Das Ergebnis der Nitrierung wird im allgemeinen charakterisiert durch das Stickstofftiefenprofil, das Randschichtgefüge, die Härte der Randschicht und deren Verschleiß- und Korrosionseigenschaften.

## Probleme bei der Nitrierung von Aluminiumwerkstoffen

Während die Nitrierung für eine ganze Reihe von Eisenwerkstoffen im industriellen Maßstab betrieben wird, ist die erfolgreiche Nitrierung

die Ionenflussdichte, die Dauer der Nitrierbehandlung, die Temperatur und die Restgaszusammensetzung.

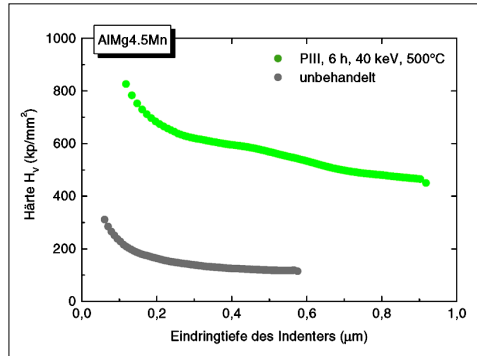
Im vergangenen Jahr war die Ionen-Nitrierung von Aluminiumwerkstoffen Gegenstand anwendungs- und grundlagenorientierter Forschung im FZR. In den nachfolgenden Ausführungen wird eine Auswahl der bislang erzielten Ergebnisse in allgemeinverständlicher Form dargestellt. Diese Auswahl gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil ist der Charakterisierung der erzielten Nitrierergebnisse gewidmet. Im zweiten Teil wird über Untersuchungen zum Stofftransport während der Ionen-Nitrierung von Aluminium berichtet.

### Charakterisierung der erzielten Nitrierergebnisse

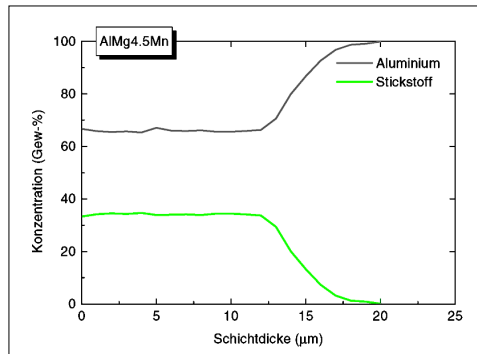
Untersucht wurden reines Aluminium als Vergleichsmaterial sowie die beiden Legierungen AlMgSi1 und AlMg4.5Mn. AlMgSi1 wird in der Praxis sehr häufig eingesetzt, AlMg4.5Mn ist eine sogenannte Knetlegierung, bei der bei moderaten Temperaturen im Volumen kein signifikanter Härteverlust eintritt.

Der Stickstoff wurde mittels Plasma-Immersionen-Ionenimplantation (PIII) in den Oberflächenbereich des Aluminiumwerkstoffs bei 500°C eingebracht. Die Behandlungszeiten lagen zwischen 2 und 8 Stunden. Die Energie der Stickstoffionen (im wesentlichen  $N_2^+$ ) betrug 40 keV, das entspricht einer mittleren Eindringtiefe von ca. 25 nm. Man erhält eine schwarze, samtartig aussehende, harte (siehe Abbildung 1) Oberflächenschicht, die mehrere Mikrometer in die Tiefe reicht. Sie besteht – wie durch Röntgenbeugung nachgewiesen werden konnte – nur aus Aluminiumnitrid (AlN). Reines auf chemischem Wege hergestelltes AlN ist ein keramischer Werkstoff und besitzt eine Härte  $H_V$  von 1200 kp/mm<sup>2</sup>. Aufgrund der geringen Löslichkeit von Stickstoff in Aluminium entsteht nur eine Aluminiumnitridverbindungsschicht (keine Diffusionsschicht).

Abbildung 2 zeigt ein für die Nitrierung von Aluminium typisches Konzentrationsprofil des eingebauten Stickstoffs. Es wurde mittels optischer Glimmentladungsspektroskopie bestimmt. Aufgetragen ist hier der Anteil der einzelnen Komponenten in Gewichtsprozenten über den Abstand von der Oberfläche in Mikrometern. Der Plateau-artige Bereich ent-



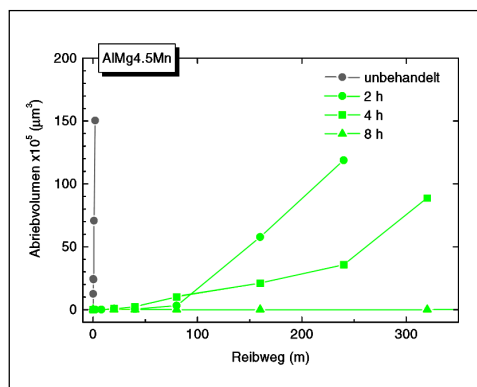
**Abb. 1**  
Gemessene Härte  $H_V$  in Abhängigkeit von der Eindringtiefe des Indenters für eine unbehandelte und mittels PIII nitrierte Probe der Legierung AlMg4.5Mn.



**Abb. 2**  
Tiefenprofil von Stickstoff und Aluminium in einer mittels PIII (6 h, 40 keV, 500°C) nitrierten AlMg4.5Mn-Probe.

spricht in seiner Zusammensetzung exakt dem AlN mit einem Verhältnis Al:N = 1:1. Durch PIII konnten bislang AlN-Schichten mit bis zu 15 µm Dicke hergestellt werden, die eine sehr gute Haftung auf dem Grundwerkstoff zeigten. Bei durchgeführten Ritztests konnten keinerlei Abplatzungen der AlN-Schichten beobachtet werden. Die Dicke der AlN-Schicht ist bei gleichen Prozessparametern werkstoffabhängig. Nitrierungen bei verschiedenen Temperaturen zeigten, dass unterhalb 400°C nahezu kein Aluminiumnitrid gebildet wird. Die erreichten Schichtdicken liegen unter 1 µm und sind damit technologisch uninteressant.

Mit Hilfe eines Stift-Scheibe-Tests wurde das Verschleißverhalten der nitrierten Aluminiumwerkstoffe untersucht. Abbildung 3 zeigt für ver-



**Abb. 3**  
Verschleißverhalten (trocken) von mittels PIII (Zeiten wie angegeben, 40 keV, 500°C) nitriertem AlMg4.5Mn im Vergleich zum unbehandeltem Material. Reibkörper: WC-Kugel, Ø 3mm, Last 1 N, Geschwindigkeit: 1,5 cm/s.

schiedene Nitrierzeiten das durch eine definiert belastete Wolframkarbidkugel abgeriebene Verschleißvolumen in Abhängigkeit vom Reibweg der Kugel auf der Oberfläche. Der Verschleiß des nitrierten Werkstoffs ist signifikant reduziert. Erst nachdem die AlN-Schicht durchgerieben und somit der Grundwerkstoff erreicht wurde, nimmt der Verschleiß wieder deutlich zu.

**Abb. 4**  
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer mittels PIII (6 h, 40 keV, 500 °C) nitrierten AlMg4.5Mn-Probe

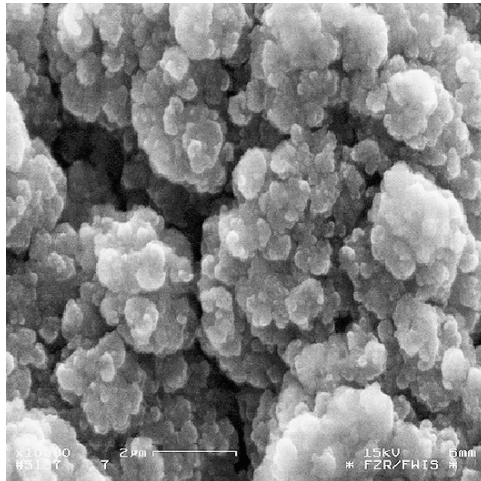


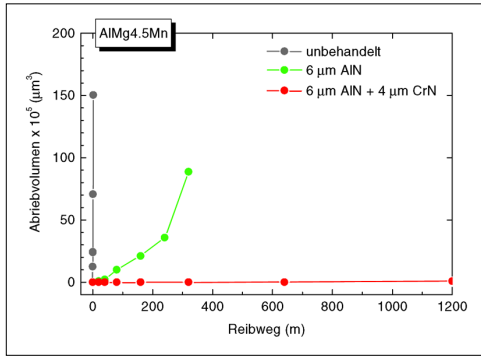
Abbildung 4 veranschaulicht in einer raster-elektronenmikroskopischen Aufnahme die Topografie einer mittels PIII nitrierten Oberfläche des Werkstoffs AlMg4.5Mn in 5000-facher Vergrößerung. Es hat sich eine knäuelartige Struktur des AlN mit Hohlräumen ausgebildet. Ähnliche Strukturen findet man auch bei den anderen untersuchten Aluminiumwerkstoffen. Die gebildeten Strukturen lassen erwarten, dass sich in den Hohlräumen gut Schmierstoffe deponieren lassen und dadurch das Gleitverhalten (z.B. Kolben im Motor, Zylinderlaufbuchsen, Gleitschienen etc.) verbessert werden kann. Weiterhin sollten zusätzlich aufgebrauchte Schutzschichten gut haften.

Getestet wurde auch das Korrosionsverhalten der erzeugten AlN-Schichten. Dabei wurde eine nach dem PIII-Verfahren hergestellte Nitridschicht mit einer mittels üblicher Plasmanitrierung erzeugten Schicht verglichen. Es zeigte sich, dass die plasmanitrierte Schicht bereits nach einer Minute völlig zerstört worden war, während die mittels PIII präparierte Schicht ca. 2 Stunden dem Korrosionsangriff standhielt. Der Grund dafür ist in der geringen Dicke (ca. 1 µm) der plasmanitrierten Schicht zu suchen. Wie oben gezeigt, weisen die AlN-Schichten Hohl-

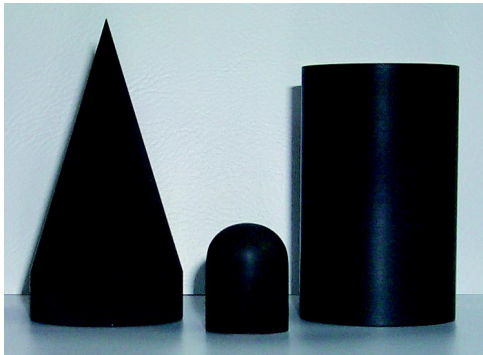
räume auf, die bei Schichtdicken kleiner 2-3 µm durchaus bis zum Grundwerkstoff durchreichen können. Das Korrosionsmedium erreicht dort unmittelbar den Grundwerkstoff und löst diesen auf. Die AlN-Schicht wird unterwandert und zerstört. Die dickeren PIII-Schichten sind dicht. Ein unmittelbarer Angriff auf den Grundwerkstoff tritt nicht ein.

Bringt man auf eine Aluminiumoberfläche Hartstoffschichten (z. B. Titanitrid, Titanaluminiumnitrid, Chromnitrid o.ä.) auf, um Härte und Verschleißverhalten weiter zu verbessern, müssen diese Schichten selbsttragend sein, d.h. sie sollten eine Dicke von mindestens 8 µm aufweisen. Ansonsten wird die Hartstoffschicht unter Belastung wegen des sehr weichen Basiswerkstoffs (Härte < 100 kp/mm<sup>2</sup>) einbrechen. Der beabsichtigte Verschleißschutz ist nicht mehr gegeben. Im Gegenteil, die harten Bruchstücke können quasi wie Schleifkörper wirken und den Verschleiß zusätzlich verstärken. Selbsttragende Hartstoffschichten mit Schichtdicken > 6-8 µm besitzen aufgrund hoher Eigenspannungen oftmals nur eine geringe Haftung auf dem Grundwerkstoff und neigen deshalb verstärkt zu Abplatzungen. Das wirkt sich ebenfalls negativ auf den angestrebten Verschleißschutz aus. Abhilfe schafft hier die Nitrierung des Aluminiumwerkstoffes vor der Abscheidung der Hartstoffschicht. Die erzeugte harte AlN-Schicht im Oberflächenbereich wirkt als Stüttschicht für eine aufzubringende Hartstoffschicht. Dabei reicht eine AlN-Schicht von 5-10 µm Dicke völlig aus, um eine üblicherweise mit 2-3 µm Dicke abgeschiedene Hartstoffschicht zu tragen und deren verschleißmindernden Eigenschaften voll wirksam werden zu lassen (siehe Abbildung 5). Das Aufbringen der Hartstoffschicht kann ohne Unterbrechung des Vakuums in einem sogenannten Duplexprozess (Nitrieren des Al-Werkstoffs und Deposition der Hartstoffschicht in einer Anlage) erfolgen, was sich günstig auf die Schichtqualität und die Kosten auswirkt.

Abbildung 6 zeigt als Demonstrationsbeispiel 3 geometrische Körper aus AlMg4.5Mn, die in der PIII-Anlage des FZR bei 500 °C nitriert wurden. Wie man an der dunklen Farbe der Probekörper erkennt, erfolgte die Nitrierung gleichmäßig über die gesamte Oberfläche.



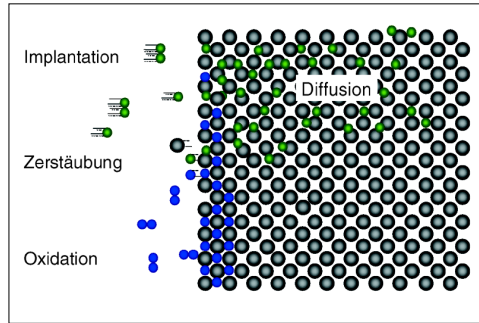
**Abb. 5**  
Verschleißverhalten (trocken) von mittels PIII nitriertem AlMg4.5Mn mit und ohne nachfolgende Beschichtung mit einer Hartstoffschicht (als Beispiel CrN) im Vergleich zum unbehandeltem Material. Reibkörper: WC-Kugel, Ø 3 mm, Last 1 N, Geschwindigkeit: 1,5 cm/s.



**Abb. 6**  
Demonstrationsbeispiele für mittels PIII nitrierte Aluminiumkörper. Die Höhe der dargestellten Probekörper beträgt 80 mm.

### Untersuchungen zum Stofftransport während der Ionen-Nitrierung von Aluminium

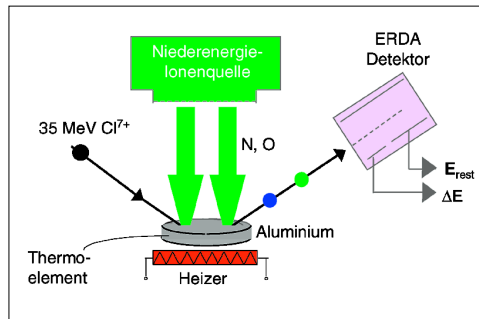
Die Transportmechanismen, die für die Ionen-Nitrierung relevant sind, lassen sich unterteilen in thermische Mechanismen und kollisionäre Mechanismen. Zu den thermischen Mechanismen zählen u.a. die Oxidation der Werkstückoberfläche aus dem Restgas und die Diffusion in der Werkstoffrandschicht. Zu den kollisionären Mechanismen zählen u. a. die ballistische Deposition der implantierten Elemente sowie die schon erwähnte Zerstäubung (siehe Abbildung 7). Während sowohl thermische als auch kollisionäre Mechanismen für sich allein genommen für viele Kombinationen von Substraten und Ionen weitgehend erforscht sind, gilt dies oft nicht für das Wechselspiel dieser Mechanismen. Das Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist es, dieses Wechselspiel für die Ionen-Nitrierung von Aluminium zu erforschen, den Transportmechanismus zu identifizieren, der die Wachstumsgeschwindigkeit der



**Abb. 7**  
Transportprozesse der Ionen-Nitrierung  
Stickstoff ist grün, Sauerstoff ist blau und die Substrat- atome sind grau dargestellt.

Aluminiumnitridschicht limitiert und ein Parameterfenster für eine optimierte Ionen-Nitrierung von Aluminiumwerkstoffen aufzuzeigen.

Ein zentrale Rolle bei den Untersuchungen zum Stofftransport nimmt ein Experiment ein, das die Bestimmung von Stickstoff- und Sauerstoff-tiefenprofilen während der Ionen-Nitrierung erlaubt (siehe Abbildung 8). Die Ionen-Nitrierung erfolgt dabei mit Niederenergie-Ionenimplantation aus einer Ionenquelle, die besonders gut für grundlegende Untersuchungen geeignet ist, da mit ihr die Prozessparameter über einen weiten Parameterbereich unabhängig voneinander kontrolliert und variiert werden können.



**Abb. 8**  
Prinzipschema zur kontrollierten Ionen-Nitrierung und gleichzeitiger Bestimmung von Tiefenprofilen mit ERDA

ERDA steht für „elastic recoil detection analysis“ bzw. für „Elastische Rückstoßatom-Detektion Analytik“). ERDA ist eine moderne ionenstrahl-analytische Methode, die zur Bestimmung von Tiefenprofilen insbesondere leichter Elemente in Dünnschichtsystemen dient. Schnelle monoenergetische Ionen aus einem Teilchenbeschleuniger dringen in die Randschicht des Werkstückes ein. Auf dem Weg in die Tiefe verlieren sie Energie und stoßen mit Substrat- atomen zusammen. Diese Stöße folgen den Gesetzen des elastischen Stoßes zweier Teilchen (Billard). Ein Teil der Atome wird aus dem Substrat herausgestoßen und von einem geeigneten Detektor hinsichtlich ihrer kinetischen Energie und ihrer Masse, bzw. Kernladungszahl analysiert. Die Anzahl der Atome, die aus dem Substrat herausgestoßen werden, ist klein im Vergleich zur Gesamtzahl der Atome in der charakterisierten Schicht. Deshalb gilt die ERDA in guter Näherung als zerstörungsfreie Analytik.

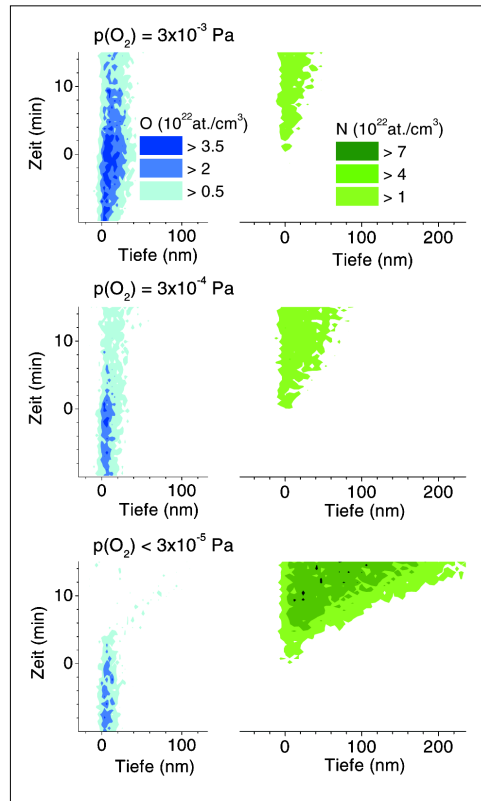
Zur Bestimmung der Tiefenprofile wird die analytische Methode ERDA mit einer für schnelle Datenaufnahme optimierten Detektortechnik eingesetzt. Vor und während der wohldefinierten Nitrierung wird mit einer Tiefenauflösung von ca. 15 nm alle 30 s ein aussagekräftiges Tiefenprofil von Stickstoff und Sauerstoff in Aluminium aufgenommen.

In Abbildung 9 sind zeit- und tiefenaufgelöste Konzentrationsverteilungen von Sauerstoff und Stickstoff dargestellt, die mit diesem Experiment gewonnen worden sind. Um die Bedeutung der Oxidschicht aufzuklären, sind Proben aus Reinaluminium bei 500 °C zunächst für 10 min un-

**Abb. 9**

Zeitliche Entwicklung der Tiefenprofile von Sauerstoff (blau) und Stickstoff (grün) vor und während der Ionen-Nitrierung von Aluminium bei verschiedenen Sauerstoffpartialdrücken

Das Konzentrationsniveau ist durch die jeweilige Farbskala in Einheiten von  $10^{22}$  Atome/cm<sup>3</sup> gegeben. Die Ionen-Nitrierung beginnt zum Zeitpunkt 0.



terschiedlichen Sauerstoffpartialdrücken ausgesetzt worden und dann bei den jeweiligen Sauerstoffpartialdrücken unter sonst identischen Prozessparametern (500 °C, 1 keV,  $2 \times 10^{15}$  N/cm<sup>2</sup>s) 15 min Ionen-nitriert worden.

Bei einem Sauerstoffpartialdruck von  $p(\text{O}_2) = 3 \times 10^{-3}$  Pa (siehe Abbildung 9, oben) wird die Oxidation des Aluminiums beobachtet. Die Dicke der Oxidschicht wächst von anfänglich ca. 10 nm in 10 min auf ca. 25 nm an. Mit Beginn der Ionen-Nitrierung zum Zeitpunkt 0 verringert sich die Dicke der Oxidschicht durch die mit dem Ionenbeschuss einhergehende Zerstäubung. Nach ca. 10 min stellt sich eine stationäre Oxidschichtdicke von wieder ca. 10 nm ein. Die Zeitentwicklung der Stickstofftiefenprofile zeigt nur sehr geringen Stickstoffeintrag in die Oxidschicht und keine signifikante Nitrierung der Randschicht. Bei  $p(\text{O}_2) = 3 \times 10^{-4}$  Pa (siehe Abbildung 9, mitte) ist ein ähnliches Verhalten zu beobachten. Die Oxidation des Aluminiums erfolgt jedoch langsamer und die stationäre

Oxidschichtdicke stellt sich bei ca. 7 nm ein. Auch die Zeitentwicklung der Stickstoffkonzentration zeigt wieder nur geringfügigen Stickstoffeintrag. Bei  $p(\text{O}_2) < 3 \times 10^{-5}$  Pa (siehe Abbildung 9, unten) wird keine signifikante Aufoxidation gemessen. Die Dicke der Oxidschicht beträgt konstant ca. 7 nm. Mit Beginn der Ionen-Nitrierung wird die Oxidschicht abgebaut. Nach ca. 5 min ist die Oberfläche von der Oxidschicht befreit. Die Zeitentwicklung der Stickstoffkonzentration zeigt, daß ein massiver Stickstoffeintrag nach der Entfernung der Oxidschicht beginnt. Von der Oberfläche aus bildet sich eine Aluminiumnitridschicht, die mit einer konstanten Wachstumsgeschwindigkeit von ca. 0,35 nm/s wächst.

Aus diesen und ähnlichen Experimenten ergibt sich folgendes Szenario für den Stofftransport während der Ionen-Nitrierung von Aluminium. Die Oxidschicht wirkt als Barriere für den diffusionskontrollierten Transport von Stickstoff. Für eine optimierte Nitrierung muss die Oxidschicht von der Oberfläche entfernt werden. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Simulationsprogrammen und gaskinetischen Betrachtungen ist dies der Fall, wenn die Rate, mit der Sauerstoff durch Zerstäubung der Oxidschicht abgetragen wird, größer ist als die Rate, mit der Sauerstoff aus dem Restgas die Oberfläche erreicht. Ist die Oxidschicht entfernt, dann ist die Wachstumsgeschwindigkeit der Aluminiumnitridschicht für einen weiten Parameterbereich limitiert durch die Differenz der Rate, mit der energetischer Stickstoff die Oberfläche erreicht und der Rate, mit der Stickstoff durch Zerstäubung der gebildeten Aluminiumnitridschicht abgetragen wird. Das Parameterfenster für eine Ionen-Nitrierung von Aluminium, die hinsichtlich der Wachstumsgeschwindigkeit der Aluminiumnitridschicht optimiert ist, wird demnach bei moderaten Ionenenergien, hohen Ionenflussdichten und sehr guten Vakuumbedingungen erwartet.

Die begonnenen Forschungsarbeiten werden sowohl grundlagenorientiert als auch im Hinblick auf eine technologische Nutzung fortgeführt.

# SELTSAME KAONEN, HADRONISCHE MATERIE UND KOSMISCHE PHASENÜBERGÄNGE

F. Dohrmann, E. Grosse, B. Kämpfer

Institut für Kern- und Hadronenphysik

Materie wird in ihrer Struktur und in ihren Veränderungen bestimmt durch vier fundamentale Wechselwirkungen bzw. Kräfte: Neben der allgegenwärtigen Schwerkraft und der wohlbekannten elektromagnetischen Kraft sind dies noch die „starke“ (hadronische) Wechselwirkung und die „schwache“ (leptonische) Wechselwirkung, die für die radioaktiven Zerfälle verantwortlich sind, die aber auch die Dynamik stellarer Systeme bis zurück zum kosmischen Urknall beherrschen. Die wesentlichen Konstituenten der Materie, die im Standard-Modell der Elementarteilchen-Physik auftreten, sind die Quarks und die Leptonen. Sie unterscheiden sich vor allem darin, dass sich die Leptonen nicht an den Prozessen der hadronischen Wechselwirkung beteiligen. Mit der Ausnahme der geheimnisvollen Neutrinos unterliegen alle Quarks und Leptonen auch der elektromagnetischen Kraft, denn sie sind elektrisch geladen. Tabelle 1 gibt eine Zusammenstellung der wichtigsten elementaren Bausteine der Materie, die in unserem Zusammenhang eine Rolle spielen.

**Tab 1**  
Zusammenstellung der in unserem Zusammenhang wichtigsten elementaren Bausteine der Materie

Eichbosonen	Quarks	Leptonen
Photonen	up (u)	Elektronen
Gluonen	down (d)	Myonen
...	strange (s)	Neutrinos

Das bekannteste Lepton, das Elektron, ist negativ geladen; sein Antiteilchen, das Positron, positiv. Der Name kommt vom griechischen  $\lambda\epsilon\pi\tau\omicron\sigma$  = schwach, leicht. Obwohl sie in ihrer Zahl nur um einen Faktor 3 hinter den Quarks zurückstehen, machen sie weniger als 0,1% der Masse der uns umgebenden Materie aus, die im Wesentlichen in den Quarks konzentriert ist, und zwar vor allem in den u-, d- und, wie im Folgenden erläutert, auch in den s-Quarks. Zwischen den Quarks wirkt die hadronische Kraft ( $\eta\alpha\delta\rho\omicron\sigma$  = stark) und genauso, wie die elektromagnetische Wechselwirkung die Struk-

tur der Atome und Moleküle bestimmt, ist die hadronische Wechselwirkung für die Struktur der Hadronen und Kerne zuständig, d. h. insbesondere für die Atomkern-Bausteine Protonen und Neutronen. Zum Beispiel bilden ein d-Quark und zwei u-Quarks das Proton, das durch die hadronische Wechselwirkung zusammengehalten wird, während zwei d-Quarks und ein u-Quark ein Neutron aufbauen. Die s-Quarks wurden zuerst in Teilchen der Höhenstrahlung entdeckt. Wegen der eigenartigen Spuren, die diese in den Photoplatten hinterließen, nannte man sie seltsam (engl. strange). Da man heute weiß, dass die Seltsamkeit (engl. strangeness) eine fundamentale Eigenschaft ist, muss man diese als eine neue „Quantenzahl“ so akzeptieren, wie vor 200 Jahren A. Volta und C. A. Coulomb die Ladung als neue Qualität der Materie erkannten. Heute würde man sagen: die elektrische Ladung ist eine Quantenzahl, die bei allen bekannten Prozessen erhalten bleibt.

Während die Quantenzahlen der Hadronen (z. B. elektrische Ladung, Strangeness) durch die genannten Valenzquarks festgelegt sind, werden andere Eigenschaften (z. B. Masse, Spin) durch weitere Beimischungen aus Quarks und Antiquarks sowie durch das Gluonenfeld beeinflusst, das die starke Wechselwirkung vermittelt. Symbolisch kann man nach dem Gesagten also für die Valenzquarkstruktur des Protons notieren:  $p = \bar{d}u + \dots$ , wobei ... für die Beimischungen  $uu$ ,  $\bar{d}\bar{d}$  und  $ss$  sowie das Gluonenfeld steht. Hier bedeutet ein Querstrich über einem Symbol, dass es sich um das entsprechende Antiteilchen handelt. Das Gewicht der jeweiligen Beimischung variiert; vor allem ist das Gewicht der  $s\bar{s}$ -Beimischung nur ungenau bekannt.

So wie die Photonen, die Lichtteilchen, die Quanten der elektromagnetischen Kraft sind, so sind die Gluonen als Eichbosonen die Quanten der hadronischen Wechselwirkung. Der Beitrag der Gluonenbeimischung ist beträchtlich, da die Gluonen auch miteinander stark wechselwirken. Die Bestimmung des

Gluonbeimischungs-Koeffizienten ist daher von fundamentalem Interesse für unser Verständnis dafür, „was die Welt im Innersten zusammenhält“. Insbesondere führt die große Stärke der hadronischen Wechselwirkung zu einem wichtigen Beitrag des Gluonenfeldes zur Masse der die normale Materie ausmachenden Protonen und Neutronen. Die Hadronenphysik beschäftigt sich somit auch mit der Frage des Ursprungs der Masse der uns umgebenden Materie – und damit auch unserer eigenen Masse.

Experimentell zugänglich ist vor allem der Gewichtskoeffizient der  $s\bar{s}$ -Beimischung, der vor allem auch für das detaillierte Verständnis der starken Wechselwirkung wichtig ist. Experimente zu seiner genaueren Bestimmung werden in verschiedenen Labors durchgeführt, die in der Lage sind, Hadronen oder ganze Atomkerne auf nahezu Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. Stoßen bei genügend hohen Energien entweder diese Projektile aufeinander oder auf einen ruhenden „Target“-Kern, können neue Teilchen erzeugt werden. Dabei wird ein beträchtlicher Teil der kinetischen Energie der ursprünglichen Teilchen in die Ruhemassenenergie der neuen Teilchen umgewandelt. So lassen sich viele neuartige Teilchen produzieren, die instabil sind und deshalb in unserer natürlichen Umgebung allenfalls im Zusammenhang mit energetischer Höhenstrahlung vorkommen. Trotz ihrer Kurzlebigkeit kann man aus den Eigenschaften der neu erzeugten Teilchen wichtige Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen und Merkmale der elementaren Materiebausteine der Materie ziehen. Die Erkenntnisse dazu sind in einem Theoriegebäude zusammengefasst, das die oben schon einmal genannte Bezeichnung „Standard-Modell der Elementarteilchen“ trägt. Während man in der Hochenergiephysik vor allem versucht, immer neuere Teilchen zu erzeugen und damit die Grenzen des Standard-Modells herauszuschieben, befasst man sich in der Mittelenergiephysik mit den bereits bekannten Teilchen und studiert mit und an ihnen die Eigenschaften von komplexen, stark wechselwirkenden Systemen. Wie wir im Folgenden darstellen wollen, hat die Forschung zur Hadronenphysik im Mittelenergiebereich unmittelbare Bezüge zu astrophysikalischen und kosmologischen Fragen und trägt neben einer Vertiefung des Kenntnisstandes über fundamentale Wechselwirkungen im Mikrokosmos zum Verständnis des Makrokosmos bei.

## 1. Kaonen

Als ein für das Weitere wichtiges Beispiel wollen wir nun die Proton-Proton (pp) -Reaktion

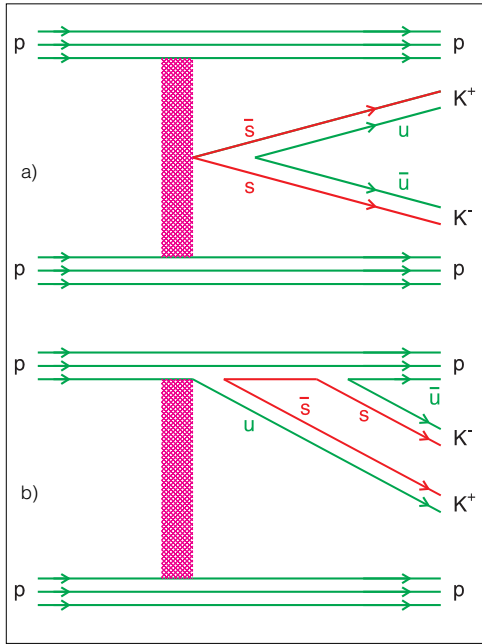


betrachten. Diese tritt etwa auf, wenn ein Protonenstrahl auf ein Wasserstofftarget trifft und dort mit den Kernen des Wasserstoffs (also wiederum Protonen) kollidiert. Um das Kaon  $K^+$  und das Antikaon  $K^-$  zu erzeugen, müssen die Protonen im Eingangskanal genügend kinetische Energie mitbringen. Nach der Einstein-Formel  $E = Mc^2$  braucht man zur Erzeugung der Masse eines Kaonenpaares mindestens eine verfügbare kinetische Energie von  $E_{\min}^{(1)} = (M_{K^+} + M_{K^-})c^2 = 987 \text{ MeV}$  im Eingangskanal.

Das Wort „Eingangskanal“ bezeichnet den Anfangszustand, während der Endzustand in einer Reaktion „Ausgangskanal“ genannt wird.

Eine Besonderheit der betrachteten Reaktion liegt in der Quarkstruktur der Kaonen: das positiv geladene Kaon  $K^+$  ist aus den Valenzquarks  $u\bar{s}$  aufgebaut, während für das negativ geladene Antikaon  $K^-$  entsprechend  $\bar{u}s$  gilt. Hier steht „s“ wieder als Symbol für das oben schon einmal genannte seltsame (strange) s-Quark. Die Seltsamkeit (Strangeness) ist eine Quantenzahl, die bei allen Prozessen der starken Wechselwirkung erhalten bleibt. Der Erhaltungssatz für Strangeness hat zur Folge, dass in starken Wechselwirkungsprozessen durch die verfügbare kinetische Energie neue Materie in Form von seltsamen Quarks assoziiert erzeugt wird, d. h. es entsteht zunächst ein  $s\bar{s}$ -Paar, das sich dann innerhalb einer extrem kurzen Zeit und Distanz mit einem  $u\bar{u}$ -Paar zu einem  $K^+K^-$ -Paar umstrukturiert. Dies soll die schematische Abb. 1a verdeutlichen. Eine etwas andere Möglichkeit ist in Abb. 1b dargestellt: Hier wird ein Valenzquark eines Protons „abgezweigt“ und baut mit dem  $\bar{s}$ -Quark eines durch die Wechselwirkung (als schraffierte Gebiete angedeutet) erzeugten  $s\bar{s}$ -Paares ein  $K^+$  auf, während das neugebildete  $u\bar{u}$ -Paar das u-Quark zur Komplettierung des Protons abgibt und das verbleibende  $\bar{u}$ -Quark mit dem verbleibenden s-Quark zum  $K^-$  kombiniert. Man kann diesen Prozess auch etwas anders interpretieren: Durch die starke Wechselwirkung wird die  $s\bar{s}$ -Beimischung aus dem Proton „herausgeschlagen“ und strukturiert sich anschließend zu dem  $K^+K^-$ -Paar um. Offen-





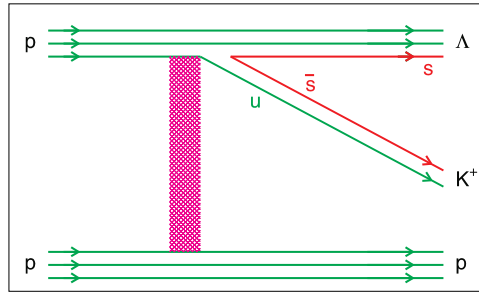
**Abb. 1**  
Flussdiagramme der Valenzquarks für die  $K^+K^-$ -Erzeugung im  $pp$ -Stoß.  
a) zeigt die resonante Erzeugung, in der beide Protonen gleich stark involviert sind,  
b) stellt die nicht-resonante Erzeugung dar, in der ein Proton eine „Beobachterrolle“ spielt. Das schraffierte Gebiet soll die Wechselwirkung der Teilchen im Eingangskanal andeuten. Grüne Linien bezeichnen u- und d-Valenzquarks, während rote Linien sich auf die s-Quarks beziehen.

sichtlich ist damit die Wahrscheinlichkeit für diesen Mechanismus vom Gewichtskoeffizienten der  $s\bar{s}$ -Beimischung in den Protonen abhängig. Allerdings spielen noch weitere Faktoren eine Rolle, so dass insgesamt die Bestimmung des  $s\bar{s}$ -Beitrages schwierig ist.

Neben dem Prozess (1) gibt es viele andere, in denen s-Quarks eine Rolle spielen, zum Beispiel

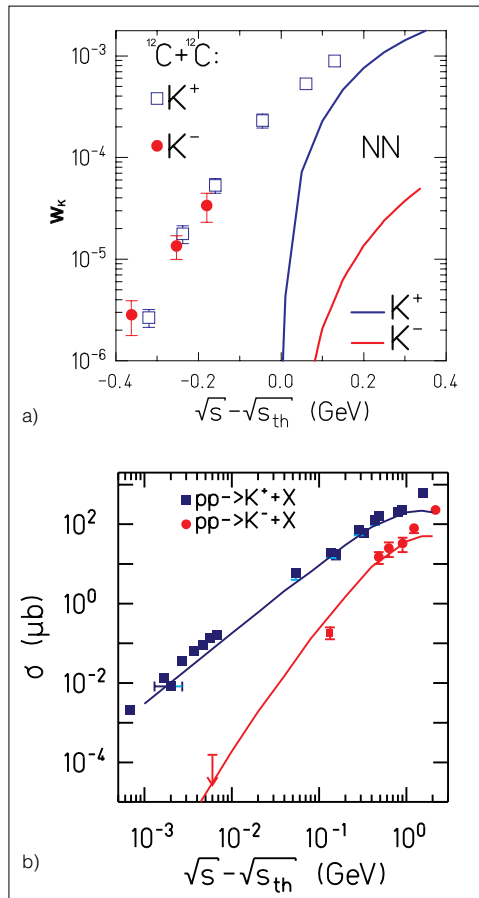


Hier wird neben dem Kaon  $K^+$  das elektrisch neutrale Lambda-Teilchen  $\Lambda = uds$  erzeugt. Das Valenzquark-Flussdiagramm in Abb. 2 soll wieder die assoziierte Strangeness-Produktion in dieser Reaktion verdeutlichen. Die aufzubringende Mindestenergie berechnet sich hier durch  $E_{\min}^{(2)} = (M_{K^+} + [M_{\Lambda} - M_p])c^2 = 671 \text{ MeV}$ , ist also deutlich geringer als die Mindestenergie für die Reaktion (1). Eine Konsequenz dieser Tatsache ist, dass bei einer Strahlenergie, die zu einer zur Teilchenerzeugung verfügbaren Gesamtenergie  $E_{\text{tot}} > E_{\min}^{(1,2)}$  führt, die Wahr-



**Abb. 2**  
Flussdiagramm der Valenzquarks für die Reaktion  $pp \rightarrow p\Lambda K^+$ .

scheinlichkeit für den Prozess (2) größer als diejenige für den Prozess (1) ist. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 3b dargestellt. Die Kurven stellen Berechnungen mit einem Modell von A. Sibirtsev (Universität Giessen) dar. Es parametrisiert die geeignet normierten Erzeugungswahrscheinlichkeiten  $\sigma$  für Antikaonen in der Reaktion (1) und Kaonen in der Reaktion (2) in Proton-Proton-Stößen. Wie man sieht, werden die Daten (Symbole) recht gut beschrieben. Ähnliche Resultate erhält man mit einem von H. Müller (Forschungszentrum Rossendorf) entwickelten Feuerball-Modell. Die Daten im oberen Teil der Abbildung 3 werden im nächsten Abschnitt dieses Artikels diskutiert.



**Abb. 3**  
Geeignet normierte Erzeugungswahrscheinlichkeiten für die Kaonen- und Antikaonenerzeugung.  
a) Erzeugungswahrscheinlichkeiten  $w_k$  als Funktion der äquivalenten Energien (letztere in linearer Skala); die Symbole sind für Schwerionenstöße (hier  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ ), während die beiden Kurven eine Modellübertragung der  $pp$ -Reaktionen auf Nukleon-Nukleon-Stöße (NN) darstellen.  
b) etwas anders normierte Erzeugungswahrscheinlichkeiten  $\sigma$  als Funktion der äquivalenten Energien (letztere in logarithmischer Skala) für  $pp$ -Reaktionen. Die gezeigten Datenpunkte (Kreise für Antikaonen, Quadrate für Kaonen) in a) sind Resultate der KaoS-Kollaboration, während in b) Daten der COSY-TOF-, COSY-11- und DISTO-Kollaborationen gezeigt sind. Die Kurven (rot für Antikaonen, blau für Kaonen) stellen Modellrechnungen dar.

Eine Darstellung wie in Abb. 3b nennt man auch Vergleich von Erzeugungswahrscheinlichkeiten bei äquivalenten Energien, wobei der letzte Begriff im Wesentlichen die Größe  $E_{\text{tot}} - E_{\text{min}}^{(1,2)}$  bezeichnet. Der Gepflogenheit der internationalen Fachliteratur folgend, haben wir die Abszisse mit  $\sqrt{s} - \sqrt{s_{\text{th}}}$  statt  $E_{\text{tot}} - E_{\text{min}}^{(1,2)}$  bezeichnet, wobei für „th“ für engl. threshold (Schwelle) steht. Man beachte die logarithmischen Skalen der Ordinate und Abszisse. Mit kleiner werdendem Wert von  $\sqrt{s} - \sqrt{s_{\text{th}}}$  nähert man sich immer mehr den absoluten „Nullpunkten“ der Reaktionen, und die Wahrscheinlichkeiten für die Teilchenerzeugung wird rapide kleiner. Als wichtigen Punkt wollen wir hier festhalten, dass im betrachteten Bereich für die normierten Erzeugungswahrscheinlichkeiten gilt  $\sigma_{\text{K}^+} > \sigma_{\text{K}^-}$ .

## 2. Schwerionenstöße

Bereits einige Zeit vor den in Abb. 3b gezeigten experimentellen Resultaten zu pp-Reaktionen haben die KaoS- und FOPI-Kollaborationen am Schwerionen-Synchrotron SIS der GSI in Darmstadt die Kaonen- und Antikaonen-Erzeugung in Schwerionenstößen untersucht (die Akronyme sind in der Box 1 erläutert). Das Wort Schwerionenstoß steht hier für den Zusammenprall von Atomkernen, die zu einem großen Teil ihrer Elektronen entledigt sind. Die Atomkerne können dabei genau wie andere geladene Teilchen in Beschleunigern auf hohe kinetische Energien gebracht werden und werden dann auf ein Target geschossen, wo sie mit den Atomkernen des Targetmaterials kollidieren. Ein Beispiel von Analysen eines solchen Experiments (hier für die Reaktion  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ ) ist in der Abb. 3a dargestellt. Völlig unerwartet hat man gefunden, dass bei äquivalenten Energien die normierten Wahrscheinlichkeiten  $w_{\text{K}}$  für die Kaonen- und Antikaonen-Erzeugung in Kern-Kern-Stößen in einem weiten Bereich etwa gleich groß sind. Diesen Sachverhalt hat die KaoS-Kollaboration, in der Rossendorfer Physiker maßgeblich mitarbeiten, in den letzten Jahren systematisch für verschiedene symmetrische Schwerionenstöße, z. B.  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ , untersucht und immer wieder bestätigt. In die Abb. 3a sind noch die Kurven aus Abb. 3b übertragen und mit NN (für Nukleon-Nukleon) gekennzeichnet. Mit dem Symbol NN soll dabei deutlich gemacht werden, dass es sich um eine Extrapolation des in Abb. 3b benutzten Modells handelt, das den Mittelwert von Proton-Proton (pp)-, Proton-Neutron- und Neu-

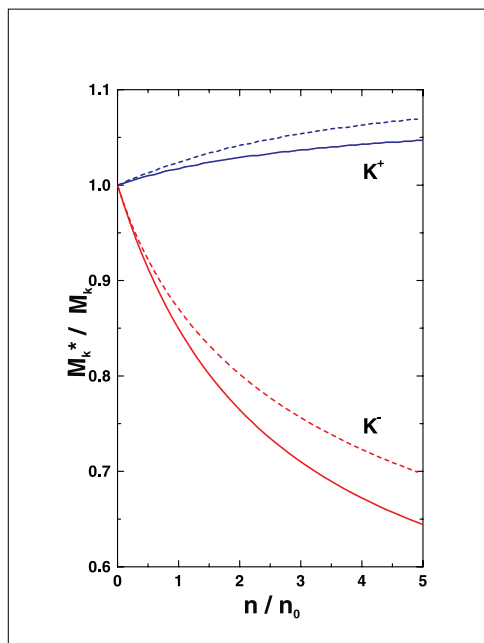
tron-Neutron-Stößen darstellt. Man sieht auch hier, dass die Erzeugungswahrscheinlichkeit  $w_{\text{K}}$  für Kaonen (blaue Linie) viel größer ist, als diejenigen für Antikaonen (rote Linie).

Beim Betrachten der Abb. 3a fällt sofort auf, dass die Daten für NN- und  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ -Reaktionen in verschiedenen Abszissen-Abschnitten liegen. In der Tat handelt es sich bei den Schwerionendaten weitgehend um sogenannte Subschwelle-Messungen, bei denen die verfügbare äquivalente Energie im Prinzip negativ ist, so dass in diesem Bereich in NN-Stößen gar keine Erzeugung von Kaonen auftreten kann. Das bedeutet, dass bei den Schwerionenreaktionen Mehrstufenreaktionen (d. h. solche, bei denen z. B. mehr als zwei Protonen bzw. Nukleonen ihre verfügbare Energie „zusammenlegen“) und andere kooperative Effekte eine Rolle spielen. Diese Notwendigkeit der Kooperation führt aber gerade zu einer großen Empfindlichkeit der  $\text{K}^{\pm}$ -Erzeugungsprozesse auf diejenigen Kräfte, die das Hadronenmedium in der Nähe des Erzeugungsortes ausübt. Natürlich treten bei der Kaonen-Erzeugung in Schwerionenstößen noch eine ganze Reihe weiterer Elementarreaktionen auf. Zum Beispiel kann in einem elementaren pp-Stoß als Subprozess ein Pion ( $\pi$ ) gebildet werden, das mit einem weiteren Proton die Reaktion  $\pi^0 p^+ \rightarrow \Lambda K^+$  durchführt. Es gibt verschiedene Reaktionen, in denen Kaonen erzeugt werden können. Das macht die theoretische Analyse recht schwierig, zumal eine Reihe von Elementarreaktionen nur ungenügend bekannt sind. Die bereits erwähnte Strangeness-Erhaltung verbietet glücklicherweise viele Prozesse; insbesondere kann ein Kaon die nukleare Umgebung verlassen, ohne dabei zu annihilieren – wozu ja das im Kern normalerweise nicht vorhandene  $\bar{s}$ -Quark gebraucht würde.

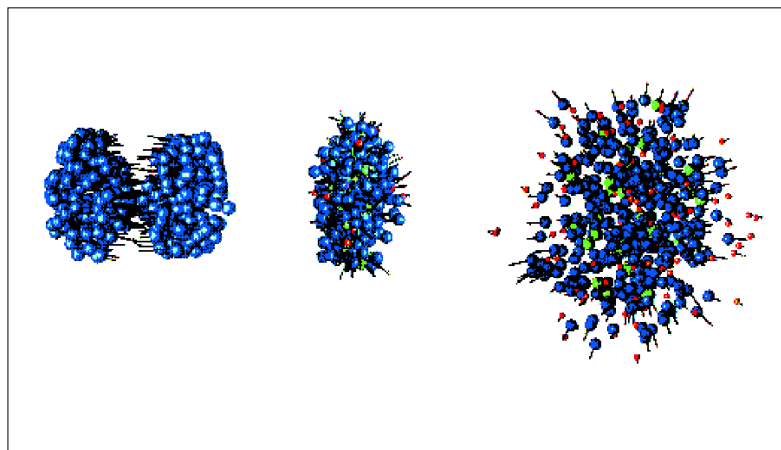
Das übereinstimmende Resultat unabhängiger Analysen mit dynamischen Modellen ist, dass die Gleichheit der Kaonen- und Antikaonen-Erzeugung in Schwerionenstößen, wie sie in Abb. 3a dargestellt ist, bei äquivalenten Energien nahe an der Schwelle am geeignetsten durch eine Absenkung der effektiven Antikaonenmasse in Materie beschrieben werden kann, was äquivalent ist zu einer großen attraktiven Kraft zwischen den Antikaonen und ihrer Kernmaterie-Umgebung.

Die Idee dazu ist nicht neu. Von der Physik der kondensierten Materie weiß man, dass in stark korrelierten Systemen sich viele Sach-

verhalte durch ein Quasiteilchenmodell beschreiben lassen. Analog erwartet man, dass auch in stark wechselwirkenden Systemen, wie den Atomkernen oder Hadronenmaterie, das Anregungsspektrum durch Quasiteilchen mit einer effektiven Masse beschreibbar ist. Die Theorie dazu wurde von verschiedenen Autoren ausgearbeitet. In Abb. 4 ist als Beispiel die Abhängigkeit der effektiven Masse der Kaonen von der Dichte dargestellt. Der Dichtebereich, der in den besprochenen Schwerionenstößen erreicht wird, erstreckt sich bis ca.  $3 \cdot n_0$ , wobei  $n_0$  die mittlere Dichte der Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Atomkern ist. Beim hochenergetischen Stoß der Atomkerne, der als Superposition vieler einzelner Stöße von Nukleonen und von Sekundärreaktionen visualisierbar ist, gibt es zunächst eine Kompression. Die damit verbundene Druckerhöhung bewirkt anschließend eine Expansion des entstandenen Hadronensystems, die bis zur völligen Disintegration geht. (Das ist in Abb. 5 illustriert.) Bemerkenswert in Abb. 4 ist die starke Massenabsenkung der Antikaonen und die leichte Massenerhöhung der Kaonen. Die verringerte Antikaonen-Masse im Medium ermöglicht die Antikaonen-Erzeugung bei kleineren Energien, als die im Abschnitt 1



**Abb. 4**  
Die effektiven Kaonenmassen als Funktion der Dichte der umgebenden hadronischen Materie. Die vollen und gestrichelten Linien basieren auf zwei verschiedenen Parametersätzen eines theoretischen Modells von E. E. Kolomeitsev (Doktorarbeit, Forschungszentrum Rossendorf, Feb. 1997, FZR-167).



**Abb. 5**  
Der von S. Bass (Michigan State University) theoretisch simulierte räumliche und zeitliche Ablauf eines Kernzusammenpralls in drei sich jeweils um  $3 \cdot 10^{-23}$  Sekunden unterscheidenden Zeitabschnitten (im Schwerpunktsystem betrachtet). Die Annäherungsphase (links, aufgrund relativistischer Effekte sind die Kerne in Bewegungsrichtung verkürzt), die Hochdichtephase (Mitte) und die Expansionsphase (rechts). Man erkennt, dass in der Hochdichtephase Nukleonen-Resonanzen (grün) angeregt werden, die anschließend durch die Emission von Mesonen (rot) zerfallen. In der Endphase der Kollision fliegen die Teilchen explosionsartig in alle Richtungen weg.

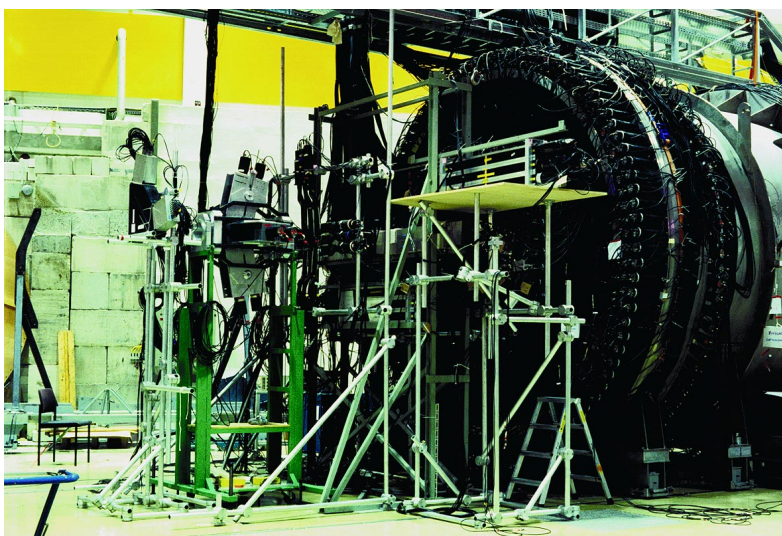
angeführten Abschätzungen für das Vakuum ergeben haben. Damit ist, sehr vereinfacht ausgedrückt, ihre Erzeugung bei gleichen äquivalenten Energien viel wahrscheinlicher. Seitens der Theorie findet das unterschiedliche Verhalten der Kaonen in Materie ihre Erklärung durch eine zweikomponentige starke Wechselwirkung, wobei für die Antikaonen sich beide Komponenten zu einer stark attraktiven Kraft addieren, während sie sich für die Kaonen gegenseitig nahezu kompensieren. Dieses entgegengesetzte Verhalten macht die Kaonen zu solch interessanten Sonden von dichter Hadronenmaterie. Bei zentralen Stößen von Kernen bei Energien, die am Schwerionen-Synchrotron SIS an der GSI erreicht werden, ist die Dichteerhöhung genügend groß, um signifikante Effekte zu erzielen.

Die KaoS- und FOPI-Kollaborationen, an denen neben Kollegen von der GSI Darmstadt und aus deutschen und europäischen Hochschulen auch Rossendorfer Physiker beteiligt sind, haben jüngst das Verhältnis der Zahl von erzeugten Kaonen und Antikaonen in Schwerionenstößen als Funktion der kinetischen Energie der Kaonen studiert und finden eine charakteristische Abhängigkeit, die mit Vorhersagen dynamischer Modelle, die die Antikaonen-Massenabsenkung implementiert haben, übereinstimmt. Damit scheint die Hypothese der Massenabsenkung der Antikaonen in dichter Hadronenmaterie eine weitere Unterstützung zu bekommen.

### 3. Weitere Observable

Beim Betrachten der Abb. 3b fällt auf, dass nur wenige experimentelle Datenpunkte gezeigt sind, vor allem für Antikaonen. In der relevanten Energieregion gab es bis vor kurzem in der Tat nicht allzuviel zuverlässige Information. Deshalb sind die Messungen, die vor einiger Zeit durch die DISTO-Kollaboration (ebenfalls auch mit Rossendorfer Beteiligung) am SATURNE-Beschleuniger in Saclay durchgeführt wurden und deren Analyse gegenwärtig abgeschlossen wird, sowie jüngste Experimente am Cooler-Synchrotron COSY in Jülich von großem Wert für ein detailliertes Verständnis der Physik mit den seltsamen Kaonen.

Abb. 6 zeigt das Flugzeitspektrometer ToF der gleichnamigen Kollaboration an COSY in Jülich. Mit dieser Detektoranlage, von der wesentliche Teile in Rossendorf zusammen mit Kollegen der TU Dresden gebaut wurden, wird zum Beispiel die oben erwähnte Reaktion  $pp \rightarrow p\Lambda^+$  gemessen. Die Abbildung soll deutlich machen, welche komplexen und auch räumlich großen Installationen (Höhe: ca. 3 m, Länge: ca. 3,5 m) nötig sind, um zu neuen Erkenntnissen auf dem Gebiet der Hadronenphysik zu gelangen. Neben der ingenieurtechnischen Herausforderung des Aufbaus der Detektorkomponenten stellen die Experimentdurchführung und Datenanalyse große Anforderungen an die Kollaborationen mit der Notwendigkeit zu einer starken Spezialisierung und Fokussierung auf Teilprobleme.



**Abb. 6**  
Ansicht des ToF-Detektors, der am COSY in Jülich elementare Hadronenreaktionen vermessen kann. Die Höhe des Detektors beträgt ca. 3 m und seine Länge ca. 3,5 m. Der rechte Teil (das sogenannte Fass) wurde in Rossendorf erstellt.

Um diesem Trend entgegenzuwirken, wurde u. a. im Forschungszentrum Rossendorf im Dezember 1998 ein Workshop zur schwellennahen Strangeness-Erzeugung durchgeführt, an dem alle auf diesem Gebiet aktiven europäischen Gruppen vertreten waren. Im Mittelpunkt stand die Kaonenerzeugung und ein detaillierter Vergleich der verschiedenen theoretischen Modelle untereinander sowie mit den neuesten Daten. Dabei wurde deutlich, dass es eine Reihe noch zu klärender Fragen gibt, bevor man die Interpretation der unerwartet starken Antikaonen-Erzeugung durch die Massenabsenkung als abschließend gesichert ansehen kann. Vor allem wurde deutlich, dass neben den pp- und Schwerionenreaktionen auch ein Verständnis der Proton-Kern-Reaktionen von Nöten ist.

In einem Experiment an dem erstmalig zur Verfügung stehenden Protonenstrahl des SIS an der GSI Darmstadt hat die KaoS-Kollaboration im Sommer 1998 mit einem optimierten Detektoraufbau eine erfolgreiche Messreihe von Proton-Kern-Reaktionen durchgeführt. Die Datenanalyse wird bis zu zwei Jahre in Anspruch nehmen und ist u. a. Gegenstand einer Doktorarbeit im Forschungszentrum Rossendorf. Gleichzeitig hat auf einen Vorschlag von Rossendorfer Physikern hin die ANKE-Kollaboration an COSY begonnen, diese Untersuchungen auch zu kleineren Energien fortzusetzen. Für das ANKE-Experiment sind im Rossendorfer Detektorlabor einige große Detektorkomponenten gebaut worden, die erlauben, Kaonen und Antikaonen in besonders interessanten Winkelbereichen zu messen, in denen der oben erwähnte KaoS-Detektor nicht eingesetzt werden kann, weshalb die beiden Kollaborationen komplementäre Resultate erzielen.

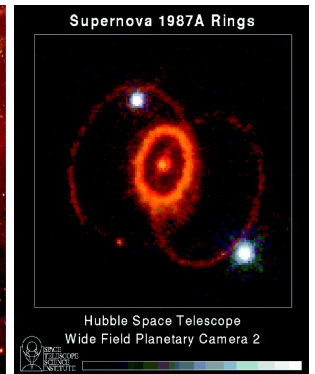
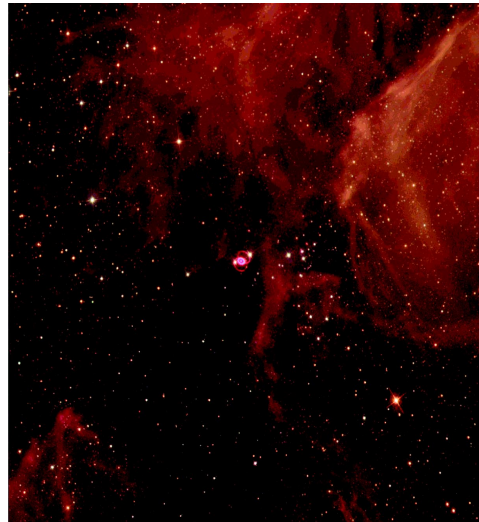
### 4. Kaonenkondensation und Neutronensterne

Nach dem oben Gesagten sind entsprechend dem gegenwärtigen Verständnis die Besonderheiten der Antikaonenerzeugung durch eine stark attraktive Wechselwirkung zu erklären. Bei sehr hoher Dichte der Kernmaterie kann die Wirkung dieser Wechselwirkung sogar so stark werden, dass eine Antikaonen-Kondensation eintritt, bei der sich möglicherweise eine kollektive Anregung mit den Quantenzahlen des Antikaons als stabile Mode ausbildet (Bose-Einstein-Kondensat). Die Kaonenkondensation kann zu enormen Konsequenzen für Neutronensterne führen, wie zuerst von G. Brown und

Mitarbeitern (Stony Brook/New York) in Zusammenarbeit mit einem Team, dem übrigens auch der über 90-jährige Nobelpreisträger Hans Bethe angehörte, bemerkt wurde.

Der Effekt der Kondensation führt dazu, dass bei vorgegebener Dichte die Kern- bzw. Neutronensternmaterie einen deutlich geringeren Druck aufbauen kann (im Vergleich mit einem Zustand ohne Kondensation). Diese Druckverminderung hat zur Folge, dass massereichere Neutronensterne instabil werden und zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Die Masse eines Neutronensterns hängt von seiner Entstehungsgeschichte ab. Nach unseren gegenwärtigen Vorstellungen entsteht ein Neutronenstern durch den Kollaps des zentralen Bereiches eines ausgebrannten massiven Sterns. Ein Teil der freigesetzten gravitativen Bindungsenergie wird dabei auf die Sternhülle übertragen, die explosionsartig abgeblasen wird und als Supernova vom Typ II sichtbar wird (siehe Abb. 7 für ein Beispiel eines Supernova-Rests). Die Leuchtkraft kann dabei diejenige einer Galaxie (d. h. einer Ansammlung von ca.  $10^{10}$  Sternen) erreichen. Entsprechend der Theorie der Neutronensterne dürften nur masseärmere Neutronensterne nicht kollabieren und damit beobachtbar bleiben, da bei ihnen die maximale Dichte im Zentrum geringer als die kritische Dichte für die Antikaonenkondensation ist. In der Tat beobachtet man nur in einem relativ begrenzten Massen-Intervall Pulsare, die eine spezielle Klasse von Neutronensternen darstellen.

Es sind allerdings noch weiterführende detaillierte theoretische Studien nötig, um deutlicher zu machen, ob das Phänomen der Antikaonenkondensation die maximale Neutronensternmasse bestimmt. Dazu sind genauere Kenntnisse der attraktiven Antikaonen-Wechselwirkung nötig. Diese sind nur aus der weiteren Analyse von  $K^-$ -Observablen in Proton-Kern- und Schwerionenreaktionen mit Hilfe von dynamischen Modellen erhältlich. Zu solchen  $K^-$ -Observablen zählen Energie- und Winkelspektren. Diese sind teilweise schon vermessen, aber die Systematik und Präzision muss noch verbessert werden. Es soll an dieser Stelle vermerkt werden, dass Antikaonen nicht nur seltsame, sondern auch seltene Teilchen sind. Als Beispiel erwähnen wir, dass selbst bei zentralen Treffern im System  $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$  am Darmstädter SIS in weniger als etwa jedem tausendsten Stoß ein  $K^-$  produziert wird. Damit sind sehr pfiffige Detektoraufbauten nötig, um  $K^-$  mit ausreichender Statistik und Präzision zu messen.



**Abb. 7**

Fotografie der Umgebung einer Supernova vom Typ II einige Jahre nach der Explosion (Quelle: Hubble Space Telescope). Zu sehen ist das Supernova-Remnant als kleine doppel-ring-förmige Struktur etwas oberhalb des Bildmittelpunktes im linken Bildteil; der rechte Bildteil zeigt eine Ausschnittsvergrößerung, in der sogar drei ringförmige Strukturen sichtbar sind. Die Natur dieser Ringstrukturen ist noch unklar. Im Zentrum dieser Ringanordnung, die sich in der Satelliten-Galaxie „Große Mangelansche Wolke“ unserer Milchstraße befindet, wurde 1987 die Supernova beobachtet. Ob der kollabierende Zentralteil des ehemaligen Sternes sich zum Neutronenstern oder zu einem Schwarzen Loch entwickelt hat, hängt von dessen Masse ab und wird erst in einigen Jahren durch Beobachtungen feststellbar sein. Bei hinreichend großer Masse und Einsetzen der Antikaonenkondensation geht der Kollaps gleich zum Schwarzen Loch; das Neutronensternstadium tritt nur als dynamisch durchlaufende Zwischenstufe auf. Die rötlichen Leuchterscheinungen im linken Bild stammen von heißen Gaswolken.

In diesem Abschnitt sollte der direkte Bezug der Hadronenphysik zu astrophysikalischen Fragestellungen an dem Beispiel der maximalen Masse von Neutronensternen verdeutlicht werden. Man sollte aber auch die Verzahnung der teilchenphysikalischen Forschung zur Untersuchung der Elementarreaktionen (z.B. an COSY in Jülich) mit der Schwerionenphysik (z.B. an SIS in Darmstadt) hervorheben. Nur wenn die relevanten Elementarreaktionen hinreichend genau bekannt sind, sind fundierte Schlussfolgerungen aus den Daten von Schwerionenreaktionen möglich.

## 5. Strangeness im Urknall

Nach dem kosmologischen Standardmodell befindet sich unser Universum im Zustand der Expansion. In frühen Phasen war die Materie heiß und hochkomprimiert. Bei einem Weltalter von etwa einer Mikrosekunde betrug die Temperatur demnach ca. 200 MeV (entsprechend  $2 \cdot 10^{12}$  K), und die Materie bestand aus u-, d- und s-Quarks, Gluonen, Elektronen, Myonen, Photonen und Neutrinos. Bei einer Temperatur von ca. 150 MeV einige Mikrosekunden später begann die Hadronisierung: Die Quarks und

Gluonen bilden kein Plasma mehr, sondern strukturieren sich zu einem heißen Gas aus Hadronen um; man kann auch sagen, die Quarks koagulieren zu Hadronen, in die die Gluonen mit eingeschlossen werden. Es ist eine besondere Herausforderung an die theoretische Forschung, Details dieses Phasenübergangs auf der Grundlage der fundamentalen Wechselwirkungstheorie von Quarks und Gluonen zu verstehen, zumal sich ein direkter Bezug zu Schwerionenstößen bei extrem hohen Energien ergibt: Bei letzteren wird der gleiche Phasenübergang erwartet – allerdings in Zeitskalen von  $10^{-23}$  Sekunden und in umgekehrter Richtung.

Bei der Hadronisierung werden durch die s-Quarks Hadronen mit Strangeness gebildet, vorrangig Kaonen. Die Strangeness-Hadronen sind instabil gegenüber der schwachen Wechselwirkung und zerfallen innerhalb von ca.  $10^{-8}$  Sekunden. Damit verschwindet die explizite Strangeness aus unserer Welt, obwohl sie eine zeitlang einen beträchtlichen Anteil an der Energiedichte der Urmaterie hatte. Wie eingangs erwähnt, besteht die Möglichkeit, dass in Protonen und Neutronen noch ein bestimmter Anteil verborgener Strangeness in Form einer  $s\bar{s}$ -Beimischung enthalten ist. Diesen kann man als primordialen Rest der Urmaterie ansehen; die in der Höhenstrahlung beobachteten seltsamen Teilchen sind dagegen vermutlich bei Kollisionen uns bereits bekannter Teilchen entstanden.

Während das hier skizzierte Szenario das plausibelste und einfachste ist, sind jedoch andere Möglichkeiten nicht ab initio auszuschließen. Es gibt zum Beispiel Spekulationen, nach denen die Hadronisierung durchaus anders abgelaufen sein könnte. Danach sollen sich nicht alle Quarks und Gluonen zu Hadronen umgewandelt haben, sondern es bildeten sich dichte Gebiete mit hoher Konzentration von Quarks, die durch die s-Quarks stabilisiert werden. Diese dichten Quark-Klumpen nennt man Strangelets. Nach den Wunschvorstellungen einiger Teilchenphysiker sollen die Strangelets einen wesentlichen Anteil der festen Materie im Universum ausmachen, aber wegen ihrer besonderen Eigenschaften nicht in Sternen konzentriert sein. Solche Vorstellungen sind den Astrophysikern willkommen. Man braucht nämlich zum Verständnis der Galaxiendynamik einen größeren Massenanteil als den, der als leuchtende und damit beobachtbarer Materie in den Sternen konzentriert ist. Strangelets sind



**Abb. 8**

Eine weit entfernte Gruppe von Galaxien (fast jeder der verschwommen wirkenden Flecken stellt eine Galaxie dar). Um die Dynamik der Galaxien zu verstehen, muss die Existenz von Dunkel-Materie postuliert werden, d. h. einer solchen Materieform, die zwar einen essentiellen Massenanteil trägt, aber nicht zum Leuchten der Galaxien beiträgt. Strangelets sind Kandidaten für Dunkel-Materie.

solche Kandidaten für die postulierte Dunkel-Materie, die man nicht im Universum beobachten kann (vergl. Abb. 8).

Die Idee der Strangelets wurde von etlichen Experimentatoren als so interessant betrachtet, dass man in zwei dedizierten Schwerionexperimenten bei hohen Energien danach gesucht hat – allerdings ohne Erfolg. Die allgemeine Interpretation zielt darauf ab, die virulente Dynamik des Hochenergie-Schwerionenstoßes als für die Bildung von Strangelets zu ungünstig zu betrachten. Für weitere Details der in diesem Abschnitt beschriebenen Überlegungen kann auf das folgende Buch verwiesen werden: B. Kämpfer, B. Lukacs, G. Paal, *Cosmic Phase Transitions*, Teubner-Verlag Stuttgart 1994.

## 6. Ausblick: HADES

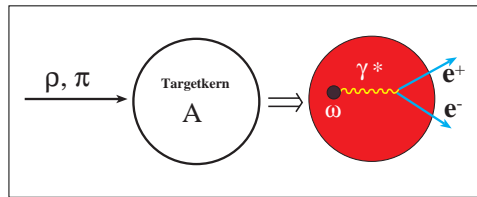
Im Abschnitt 2 ist herausgestellt worden, dass die unerwartete Verstärkung der Antikaonen-Erzeugung in Schwerionenkollisionen, die zuerst durch die KaoS-Kollaboration beobachtet wurde, eine Erklärung in der Hypothese der Massenabsenkung durch den attraktiven Anteil der starken Kraft findet. Kaonen zeigen sich demnach als sensitive Sonden von Hadroneneigenschaften in einem dichten, stark wechselwirkenden Medium. Aufgrund der Komplexität der Dynamik und der vielen, teilweise nur ungenau bekannten Hadronenreaktionen ist ein direkter Beweis der Veränderung der effekti-

ven Hadronenmassen wünschenswert. In der Tat gibt es dazu ausgearbeitete Vorstellungen, die hier skizziert werden sollen.

Neben den bereits häufig erwähnten Protonen, Neutronen und Kaonen gibt es noch viele weitere Hadronen. Unter anderem solche, die bezüglich des Spins die gleichen Quanteneigenschaften wie das Photon tragen und deshalb direkt mit diesem verknüpft sind. Als Beispiel sei das  $\omega$ -Meson genannt, das ein instabiles Teilchen ist. Man hat nun folgende Vorstellung: Wenn bei einer Proton-Kern- oder Schwerionenreaktion ein  $\omega$ -Meson gebildet wird, das sich relativ zu seiner Umgebung in Ruhe befindet, wird es wegen seiner relativ kurzen Lebensdauer auch in der Kernmaterie-Umgebung zerfallen. Ein interessierender Zerfallsprozess ist in der Abb. 9 dargestellt. Das  $\omega$ -Meson zerfällt in ein virtuelles Photon, das nahezu wechselwirkungsfrei die Materie verlässt und weiter in ein beobachtbares  $e^+e^-$ -Paar zerfällt. Durch die genaue Messung der Impulse des Elektrons  $e^-$  und des Positrons  $e^+$  ist die Masse des ursprünglichen  $\omega$ -Mesons bestimmbar, und damit ist die Möglichkeit gegeben, eine Massenveränderung im Medium direkt zu verifizieren.

Wegen des Genauigkeitsanspruches und vieler Untergrundreaktionen ist das entsprechende Experiment sehr schwierig und nur mit einem dedizierten Detektor durchzuführen. Rossendorfer Physiker beteiligen sich an der Konzeption dieses Experiments, das den Namen HADES trägt, und am Aufbau der entsprechenden Detektorinstallation. Wichtige Komponenten werden derzeit im Rossendorfer Detektorlabor zusammengebaut. Es handelt sich dabei um Driftkammern. Sechs Rossendorfer Driftkammern werden als Hexagon angeordnet und bilden im HADES-Experiment dann die große Driftkammer-Ebene hinter den supraleitenden Spulen. Wegen der räumlichen Größe der Driftkammern und der hohen technischen Anforderungen ist der Aufbau speziell ausgestatteter Labors vorenthalten. Mit der Entwicklung einer kostengünstigen Variante der Driftkammern leistet damit das Institut für Kern- und Hadronenphysik im Forschungszentrum Rossendorf einen wichtigen Beitrag zum HADES-Projekt und unterstützt so die beteiligten Hochschulgruppen an langjährigen Forschungsvorhaben. Gegenwärtig wird der HADES-Detektor schrittweise am Schwerionen-Synchrotron der GSI in Betrieb genommen.

Die ursprüngliche Motivation für das HADES-Experiment war, durch die direkte Verifikation der Massenveränderung von  $\omega$ -Mesonen und



**Abb. 9**

In einer Elementarreaktion wird im  $pA$ - oder  $\pi A$ -Stoß ein  $\omega$ -Meson im Kern  $A$  gebildet und zerfällt dort in ein virtuelles Photon  $\gamma^*$ , das wiederum in ein  $e^+e^-$ -Paar zerfällt.

anderen Vektormesonen in Kernmaterie einen Hinweis auf eine partielle Restauration der chiralen Symmetrie zu bekommen. Die chirale Symmetrie ist eine fundamentale Symmetrieeigenschaft der starken Wechselwirkung von Hadronen, die unter „normalen“ Umständen gebrochen ist. In einem genügend dichten Hadronenmedium wird diese Symmetrie jedoch wiederhergestellt. Einfache Modellvorstellungen gehen davon aus, dass sich die Hadronenmassen entsprechend der jeweiligen Stärke der Symmetriebrechung verändern. Damit scheint vermöge der zukünftigen Experimente mit HADES eine Bestätigung der fundamentalen Symmetrieprinzipien der Theorie der starken Wechselwirkung möglich.

#### Erläuterung der im Text verwendeten Akronyme

GSI:	Gesellschaft für Schwerionenforschung bei Darmstadt
SIS:	Schwerionensynchrotron der GSI. Beschleuniger, der weitgehend der Elektronenhülle entledigte Ionen auf Energien bis zu 2 GeV pro Nukleon bringt. Im Text spielen vollständig „gestrippte“ Ionen, also nackte Atomkerne, eine Rolle.
KaoS:	Kaonenspektrometer an der GSI; von gleichnamiger Kollaboration betrieben.
FOPI:	Four-Pi-Spektrometer an der GSI; von gleichnamiger Kollaboration betrieben.
DISTO:	Name einer internationalen Kollaboration (ursprünglich Dubna-Indiana-Saclay-Torino, später mit deutscher Beteiligung), die ein vorhandenes Magnetspektrometer ausgebaut hat und damit an SATURNE (s. u.) experimentierte.
SATURNE:	Name eines Speicherrings in Saclay/Paris, in dem Protonen bis zu Energien von 2,9 GeV beschleunigt wurden.
COSY:	Cooler Synchrotron im Forschungszentrum Jülich, in dem Protonen bis zu Energien von 2,5 GeV beschleunigt werden können, wobei die jeweilige Energie sehr präzise festgelegt ist.
ToF:	Time of Flight: Flugzeitspektrometer an COSY
ANKE:	A New Kaon Experiment Magnetspektrometer am internen Protonenstrahl des COSY
HADES:	High Acceptance Dielectron Spectrometer: großer, sich im Aufbau befindlicher Detektor an der GSI, mit dem speziell Elektron-Positron-Paare gemessen werden können.

#### Kurzes Kompendium zur Erläuterung der erwähnten Begriffe

Unter Kernmaterie versteht man ein Medium aus Protonen und Neutronen mit etwa gleicher Häufigkeit; die Dichte in Atomkernen entspricht etwa  $\rho_0 = 2,7 \cdot 10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Neutronensternmaterie ist ein Medium, das hauptsächlich aus Neutronen besteht, die durch eine Beimischung (ca. 5 %) von Protonen gegenüber dem  $\beta$ -Zerfall entsprechend der Reaktion  $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$  stabilisiert sind ( $\bar{\nu}_e$  steht hier für das Elektron-Antineutrino); elektrische Ladungsneutralität wird durch eine Beimischung von Elektronen gesichert. Bei Dichten oberhalb von  $\rho_0$  werden auch andere Hadronen gebildet; wenn die oben beschriebene Massenabsenkung auftritt, werden z. B. Antikaonen so stark angereichert, dass man eigentlich von Strangeness-Hadronensternen statt von Neutronensternen sprechen sollte.

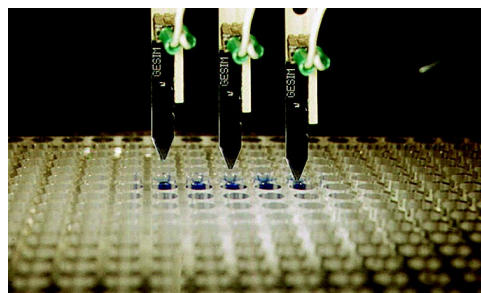
Neutronensterne haben typische Massen von  $1,4 M_\odot \pm 20\%$  ( $M_\odot = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$  ist die Masse der Sonne). Wie schon erwähnt, werden sie in der Form von Pulsaren beobachtet. Pulsare sind schnell rotierende Neutronensterne, die u. a. Radiostrahlung aussenden, die mit einer Periode von einigen Millisekunden bis zu einigen Sekunden gepulst ist. Momentan hat man ca. 900 Pulsare katalogisiert. Viele von ihnen sind Partner in einem Doppelsternsystem, was erlaubt, aus den Umlaufperioden auf die Sternmassen zu schließen.

## Forschungs- und Wissenschaftstransfer im Forschungszentrum Rossendorf

**Interdisziplinäre, anwendungsorientierte Grundlagenforschung** ist das Leitmotiv der Arbeit des Forschungszentrums Rossendorf (FZR). Dabei stehen die Schwerpunkte Materialforschung, Biomedizin/Chemie, Umwelt, Sicherheitsforschung und Kernphysik im Zentrum des Interesses der Forschungsanstrengungen des FZR. Die zugrunde liegenden wissenschaftlichen Fragestellungen entspringen aktuellen Herausforderungen unserer Zeit und sollen über den Erkenntnisgewinn hinaus konkret zur nachhaltigen Lösung wissenschaftlicher und technischer Probleme beitragen.

Neuste wissenschaftliche Erkenntnisse und Know-how in innovative Produkte umzusetzen bzw. in der industriellen Fertigung anzuwenden, ist ein Ziel des Forschungs- und Wissenschaftstransfers, das beim Forschungszentrum Rossendorf groß geschrieben wird.

Der Erfolg unserer Bemühungen wird dabei allerdings nur selten so unmittelbar sichtbar wie bei der Verleihung des „Innovationspreises der deutschen Wirtschaft 1997“ im Bereich der „Start-Up-Unternehmen“ für die „Gesellschaft für Silizium-Mikrosysteme mbH“ (GeSiM mbH). Das junge Unternehmen erhielt diese Auszeichnung aus den Händen des Bundeswirtschaftsministers für die Entwicklung der kleinsten Pumpe der Welt. Mit Hilfe von Verfahren, wie sie zur Herstellung von Speicherchips und Mikroprozessoren genutzt werden, wurden komplexe Systeme entwickelt, mit denen sich Flüssigkeitsmengen im Nanoliterbereich äußerst genau dosieren lassen. Eingesetzt werden sie z. B. in Analyselabors, in denen Flüssigkeiten in winzigsten Mengen auf viele Gefäße aufgeteilt werden müssen, um sie auf ihre Inhaltsstoffe untersuchen zu können (Abbildung 1). Andere Anwendungen liegen auf dem Gebiet der Biomedizin oder -technik zur präzisen Medikamentenapplikation. Der sog. „Nano-Plotter“ als Pipetiersystem in der biomedizinischen Forschung sei hier nur als ein Beispiel erwähnt. Der sich abzeichnende Markt auf dem Gebiet der Dosierung kleinster Flüssigkeitsmengen bot der Gruppe ehemaliger Wissenschaftler und Ingenieure des Forschungszentrums Rossendorf die Chance, ihre bis dahin in den Forschungslabors des Instituts für Ionen-



**Abb. 1**

„Kleinste Pumpe der Welt“ im Einsatz im Analyselabor. Die in Siliziumtechnologie gefertigten Nanoliterpumpen mit einem minimalen Dosiervolumen von 15 Picolitern wurden von Wissenschaftlern und Ingenieuren des Forschungszentrums Rossendorf entwickelt. Das 1995 ausgegründete Unternehmen GeSiM mbH wurde mit dem „Innovationspreis der deutschen Wirtschaft 1997“ ausgezeichnet.  
Foto: GeSiM mbH

strahlphysik und Materialforschung gesammelten Erfahrungen bei der Herstellung mikrofluidischer Komponenten wie Kleinstpumpen, Injektoren, Sensoren oder leckfreien Ventilen wirtschaftlich zu nutzen. Nach einer 3-jährigen, durch das Sächsische Wirtschaftsministerium geförderten Projektphase am FZR, erfolgte 1995 eine technologieorientierte Unternehmensgründung, die ihren Platz im benachbarten Rossendorfer Technologiezentrum (ROTECH) fand. Das junge Unternehmen entwickelte sich innerhalb weniger Jahre zur Weltspitze auf dem Gebiet der Mikrofluidik.

Der Entwicklungsweg der Firma GeSiM mbH ist ein Paradebeispiel für eine mutige Ausgründung eines der Grundlagenforschung entstammenden Arbeitsbereiches des FZR. Doch nicht nur auf „neuen“ Forschungsgebieten sind solche Technologiesprünge zu erwarten. Allein durch die Natur der Grundlagenforschung, *neue* Phänomene zu erforschen, sind die Wissenschaftler nahezu permanent gefordert, ihre Messmethoden und auch die verwendete Messtechnik zu optimieren, teilweise sogar diese neu zu erfinden.

Hierbei bilden zum Einen grundlegende Arbeiten einen wichtigen Schwerpunkt wie z. B. die In-situ-Kontrolle der Tumorthherapie mit Ionenstrahlen mittels Positronen-Emissions-Tomographie durch das Institut für Kern- und Hadronenphysik. Diese neue Therapiemethode wurde in Europa erstmals im Jahre 1997 bei der



Gesellschaft für Silizium-Mikrosysteme mbH

### Ansprechpartner

GeSiM mbH  
Steffen Howitz  
im ROTECH  
Bautzner Landstraße 45  
01454 Großerkmannsdorf  
Tel. (0351) 2695-321  
Fax (0351) 2695-320  
e-Mail: howitz@gesim.de  
http://www.gesim.de





**Abb. 2**

Im Technologiezentrum Rossendorf sind derzeit 24 junge Klein- und mittelständische Unternehmen angesiedelt, die z. T. unmittelbar technologieorientierte Ausgründungen des Forschungszentrums sind. ROTECH steht in der Region als Bindeglied zwischen Forschung, Wirtschaft und Administration. Es fördert aktiv Technologie- und Know-how-Transfer aus dem FZR und unterstützt junge Unternehmen bereits im Vorfeld ihrer Gründung.

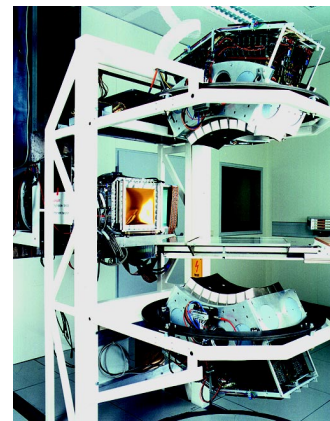
Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt zum Einsatz am Patienten gebracht. Hierbei werden die besonderen kernphysikalischen Eigenschaften hochenergetischer Ionen, wie in diesem Fall Kohlenstoff-12 mit typ. Energien von 3 GeV, genutzt. Nach Eintritt in Materie ist die biologische Wirksamkeit der schnellen Ionen sehr gering, sie nimmt mit wachsender Tiefe zu und erreicht, kurz bevor die Ionen zur Ruhe kommen, ein ausgeprägtes Maximum. Dieser räumlich eng begrenzte Bereich hoher biologischer Wirksamkeit kann durch die Wahl geeigneter Energie, durch die die Eindringtiefe der Ionen gesteuert wird, und magnetischer Ablenkung des Ionenstrahls so auf das Tumervolumen fokussiert werden, dass eine massive Schädigung der Geschwulst bei einer weitgehenden Schonung des umliegenden gesunden Gewebes erreicht werden kann. Dieses Verfahren, Raster-scanning genannt, wurde von den Kollegen der GSI technisch realisiert. Eine solche Präzisionstherapie erlaubt es prinzipiell, auch Tumore in unmittelbarer Nähe von strahlensensitiven Organen wie etwa dem Sehnerv und dem Gehirnstamm zu behandeln. Sie erfordert jedoch auch, dass die Position des Zielvolumens im Körper des Patienten mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern während der gesamten Behandlung eingehalten wird, die sich über ca. zwanzig Tage erstreckt, wobei an jedem Tag nur ein Teil der zur Vernichtung des Tumors erforderlichen Dosis appliziert wird. Deswegen sollte die Position des bestrahlten Bereiches in-situ verifiziert werden, um gegebenenfalls nach jeder Bestrahlungsfraktion korrigierend eingreifen zu können. Hier setzt der Beitrag des Forschungszentrums Rossendorf an.

Die Technik, die diese Kontrollfunktion erfüllen kann, ist die Positronen-Emissions-Tomographie. PET ist ein in der Nuklearmedizin etabliertes Verfahren (siehe auch den Beitrag „Charakterisierung gestörter Hirnfunktionen mit Hilfe von PET“ in diesem Jahresbericht auf Seite ??), das hauptsächlich Anwendung in der neurologischen, kardiologischen und onkologischen Diagnostik und Forschung findet. Bei den gängigen PET-Untersuchungen wird den Patienten eine, mit einem positronenemittierenden Nuklid markierte Substanz injiziert oder durch Inhalation verabreicht. Der radioaktive Kern wandelt sich in einen stabilen Kern und sendet dabei ein Positron aus, das nach kurzer Bremsstrecke (1 bis 2 mm in wasseräquivalentem Körpergewebe) mit einem Elektron annihiliert. Die dabei emittierten zwei koinzidenten Photonen mit einer Energie von 511keV können mit hoher Präzision ausserhalb des Patienten nachgewiesen werden. Bei entsprechender Anordnung der Detektoren lässt sich mit computertomographischen Rechenverfahren die räumliche Verteilung der radioaktiven Substanz im Körper rekonstruieren.

Bei der Krebstherapie mit Ionenstrahlen entstehen diese positronenemittierenden Kerne im Gewebe als Nebenprodukt kernphysikalischer Prozesse bei der Bestrahlung, vornehmlich durch Fragmentierung infolge peripherer Kern-Kern-Stöße. Durch gezielte Studien konnte gezeigt werden, dass aus der Rekonstruktion der Verteilung der Positronenemitter im Gewebe auf die applizierte biologisch wirksame Dosis zur Tumorbekämpfung geschlossen und auf diese Weise die Kontrolle und Optimierung der Krebstherapie realisiert werden kann. Über diese grundlegenden Arbeiten hinaus setzte das Forschungszentrum Rossendorf die „Theorie“ auch in die Praxis um. Gestützt auf die langjährige Erfahrung bei der Entwicklung von Detektoren für die kernphysikalische Grundlagenforschung, baute das FZR die für die Therapiekontrolle notwendige spezielle Positronenkamera und entwickelte, das am Standort vorhandene Know-how im Umgang mit PET zur medizinischen Diagnostik nutzend, auch die spezielle Software zur Rekonstruktion der Bild-daten. Die in-situ Kontrolle der Tumorthherapie mit Ionenstrahlen mit PET trug wesentlich zum Erfolg dieses neuen Therapieverfahrens in Deutschland bei – ein umfangreiches, wissenschaftlich anspruchsvolles und komplexes Problem, das durch anwendungsorientierte, interdisziplinäre Forschung gelöst und erfolgreich in der Praxis angewendet werden kann.



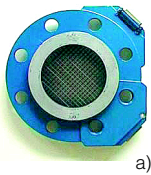
**Ansprechpartner**  
Dr. Holker Schott  
Rossendorfer Technologiezentrum GmbH  
Bautzner Landstraße 45  
01454 Großerkmannsdorf  
Tel. (0351) 2695-101  
Fax (0351) 2695-202  
e-Mail: schott@tz-rotech.de  
<http://www.tz-rotech.de>



**Abb. 3**

PET-Tomograph für die Krebstherapie mit Ionenstrahlen.

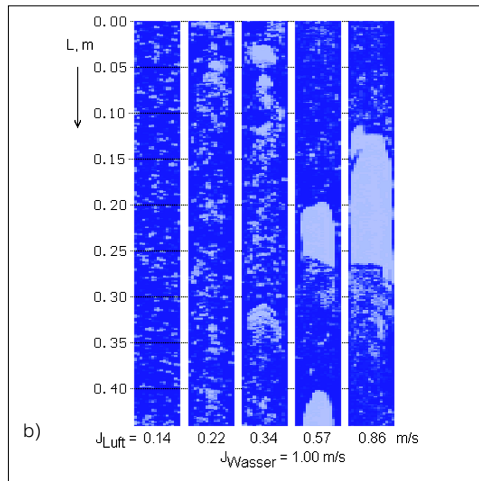
**Ansprechpartner**  
Dr. Wolfgang Enghardt  
Institut für Kern- und Hadronenphysik  
Tel. (0351) 260 3653  
Fax (0351) 260 3700  
e-Mail:  
[W.Enghardt@fz-Rossendorf.de](mailto:W.Enghardt@fz-Rossendorf.de)



a)

**Abb. 4a**

Gittersensor zur Messung des Anteils der Gas- und Flüssigphase in einer Strömung. Der gezeigte Sensor kann z. B. den Anteil von Dampfblasen und Flüssigkeit in einem Kühlkreislauf mit einer zeitlichen Auflösung von 1024 Bildern pro Sekunde über den Rohrleitungsquerschnitt aufnehmen und visualisieren.



**Abb. 4b**

Zweiphasige Luft-/Wasserströmung, visualisiert mit dem am FZR entwickelten Gittersensor. Bei Erhöhung des Luftvolumenstroms  $J_{Luft}$  geht die Blasen- zu einer Pfropfenströmung über.

Oft sind aber auch kleinere technische Entwicklungen, die nicht explizit Ziel eines Forschungsprojektes sind, die jedoch zur Lösung einer gezielten wissenschaftlichen Fragestellung entwickelt wurden, von großem Interesse für eine mögliche Anwendung.

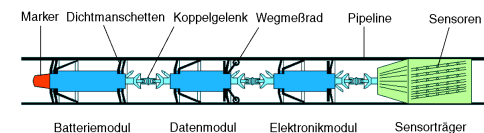
So z. B. am Institut für Sicherheitsforschung des FZR. Hier wird intensiv auf dem Gebiet der thermofluidodynamischen Modellierung von Zweiphasenströmungen, z. B. von Gas-Flüssigkeitsgemischen, geforscht. Computersimulationen sind dabei eines der Hauptinstrumente, um chemisch-verfahrenstechnische oder nukleare Anlagen so auszulegen, dass Störfälle verhindert oder zumindest beherrscht werden können. Die Modellierung dreidimensionaler Strömungsfelder steht dabei jedoch noch weitgehend am Anfang. Da jede Modellentwicklung einer experimentellen Validierung bedarf, um die Gültigkeit der Prozesssimulation zu überprüfen, wurde eine Technik entwickelt, mit der die momentane Verteilung von Gas- und Flüssigphase in einem Strömungskanal mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung gemessen und visualisiert werden kann. Es handelt sich dabei um einen *Gittersensor*, der den Unterschied der elektrischen Leitfähigkeit von Gas- und Flüssigphase ausnutzt (Abbildung 4a). Er besteht aus zwei Ebenen von gekreuzten Elektroden, die in Strömungsrichtung dicht hintereinander angeordnet sind. Die Leitfähigkeit zwischen den Kreuzungspunkten der Elektroden beider Ebenen gibt die Information über den lokalen Phasenzustand und kann über einen Messrechner ausgewertet und als Digitalvideo visualisiert werden (Abbildung 4b). Auf diese Weise werden Gasgehaltsverteilungen mit einer zeitlichen Auflösung von 1024 Bildern

pro Sekunde erhalten und damit detaillierte Untersuchungen zur Struktur von Zweiphasenströmungen möglich. Mit der erreichten zeitlichen Auflösung hat der industriell einsetzbare Gittersensor bei den Verfahren zur Strömungsvisualisierung eine Spitzenposition inne. Vergleichbare Resultate lassen sich nur mit äußerst aufwendigen Röntgenverfahren erzielen.



**Abb. 5a**

Inspektionsmolch beim Einschleusen in eine Erdgaspipeline. Mit Hilfe eines im Forschungszentrum Rossendorf entwickelten Prüfverfahrens kann die Rohrrinnenwand z. B. einer Erdölpipeline auf kleine Risse und Schädigungen durch Korrosion untersucht werden. Die Art und Position einer wenigen Millimeter großen Schädigung der Rohrwand eines bis zu 120 km langen Pipelinesegments kann mit einer Ortsauflösung von 0,2 m angegeben werden.



**Abb. 5b**

Schematischer Aufbau des Inspektionsmolchs

Von der langjährigen Erfahrung in der Materialprüfung am Forschungszentrum profitierte auch eine ingenieurtechnische Spitzenleistung der Zentralabteilung für Forschungs- und Informationstechnik. Sie entwickelte ein Mess- und Analysesystem zur Materialprüfung mit Wirbelströmen soweit, dass es zur Inspektion von langen Rohrleitungen, z. B. Erdölpipelines, eingesetzt werden kann. Ein sogenannter *Inspektionsmolch* (Abbildung 5) wird dabei in eine Erdölpipeline eingesetzt und „schwimmt“ mit dem transportierten Erdöl durch die Pipeline. Auf seiner bis zu 120 km langen Reise, die er mit einer Geschwindigkeit von bis zu 5 m/s durchführen kann, spürt die Messelektronik neben Verformungen der Rohre auch kleine Risse und durch Korrosion angegriffene Segmente der inneren Rohrwand mit hoher Zuver-

**Ansprechpartner**

Dr. Horst-Michael Prasser  
Institut für  
Sicherheitsforschung  
Tel. (0351) 260 3460  
Fax (0351) 260 3440  
e-Mail:  
H.M.Prasser@fz-Rossendorf.de



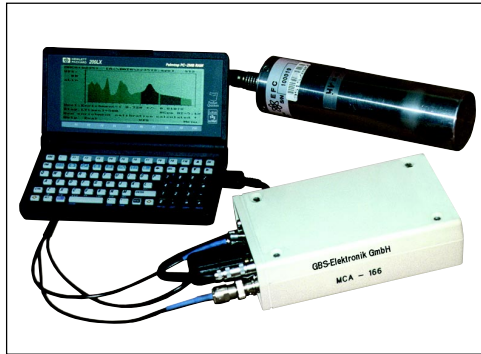
Teletronic GbR  
Dr. Dieter Peters  
im ROTECH  
Bautzner Landstraße 45  
01454 Großberkmannsdorf  
Tel. (0351) 2695-290  
Fax (0351) 2695-202  
e-Mail:  
ttronic@teletronic.tz-rotech.de  
http://www.tz-rotech.de/teletronic

**Ansprechpartner**

Dr. Frank Gabriel  
ZA Forschungs- und  
Informationstechnik  
Tel. (0351) 260 31 09  
Fax (0351) 260 31 10  
e-Mail:  
F.Gabriel@fz-Rossendorf.de

Pipetronix GmbH  
Alfred Barbian  
Lorenzstraße 10  
76297 Stutensee-Blankenloch  
Tel. (07244) 732-0  
Fax (07244) 732-199

lässigkeit und Ortsauflösung auf. Die Anwendung des Know-hows im Gebiet der Wirbelstromprüftechnik auf andere Bereiche der kontaktfreien Materialprüfung ist durchaus denkbar.



**Abb. 6**

Der tragbare 4k-Multi-Channel-Analyser (MCA 166) für Sicherheitsinspektionen/Strahlenschutz, entwickelt im Forschungszentrum Rossendorf, gefertigt von der Firma GBS Elektronik GmbH.

Ein weiteres Beispiel für eine erfolgreiche anwendungsorientierte Entwicklung stellt der Vielkanalanalysator MCA-166 (Abbildung 6) dar. Das Forschungszentrum Rossendorf beteiligte sich an einer Ausschreibung der International Atomic Energy Agency (IAEA) in Wien und setzte sich mit der Entwicklung eines kleinen transportablen Vielkanalanalysators für die IAEA und die EURATOM-Inspektoren gegen internationale, etablierte Konkurrenz durch. Der MCA 166 ist ein tragbarer 4k-Multi-Channel-Analyser (MCA) für Sicherheitsinspektionen/Strahlenschutz sowie andere Feld- und Laboranwendungen. Die Spektren werden autonom im Speicher des MCA 166 akquiriert. Die Datenanalyse kann anschließend mit einem Standard-Industrie PC, Notebook oder Palmtop-Computer durchgeführt werden. Das Gerät unterstützt die Verwendung in der Betriebsart Multichannelscaler (MCS, Messung der zeitlichen Verteilung) und kann mit einer großen Auswahl gängiger Detektoren betrieben werden, wie z. B. NaI, HPGe, CdTe, Si, He-3 usw. Der MCA-166 bietet nukleare Spektrometrie mit Laborqualität im Westentaschenformat. Er wird heute von der Firma GBS Elektronik GmbH gefertigt und z. B. als Standardgerät der IAEA und EURATOM bei Sicherheitsinspektionen eingesetzt – ein hervorragender Leistungsbeweis für Technologie und Know-how am FZR im internationalen Wettbewerb.

Doch auch angesichts dieser Erfolge bei der praxisorientierten Forschung, die Ressourcen, die zahlreichen Ideen umzusetzen, sind beschränkt, so dass sich ein Forschungsinstitut in der Regel darauf beschränkt, die wissenschaftlichen Ergebnisse zu veröffentlichen und damit die Grundlagen für darauf aufbauende Ideen und Konzepte zu säen. Den nächsten Schritt zur kommerziellen Verwertung der erarbeiteten Grundlagen, der nicht selten erst einige Jahrzehnte nach deren Entdeckung erfolgt, und damit das Ernten der Früchte der Erkenntnis muss es meist anderen überlassen. Die praxisnahe Forschung ist jedoch auch auf Gebieten unverzichtbar, die nicht zu den populären Themen unserer Gesellschaft zählen oder die keinen materiellen Gewinn erwarten lassen.

Als Beispiel hierfür stehen die Hinterlassenschaften des Uranbergbaus im Erzgebirge und in der Sächsischen Schweiz. In der Zeit des intensiven Uranbergbaus in der sächsisch-thüringischen Region, in der die DDR in der Uranerzeugung den 3. Rang in der Welt einnahm, wurde auch die Lagerstätte Königstein ausgebeutet. In 25 Jahren (1967-91) wurden dort etwa 20 000 t Uran mit Hilfe des sogenannten Auslaugungsverfahrens gewonnen. Hierzu wurde eine schwefelsaure Laugungslösung über Bohrungen in bestimmte Gesteinssegmente eingebracht. Diese Lösung durchströmte den erzhaltigen Sandstein und wurde über Drainagebohrungen wieder abgepumpt. In diesem Kreislauf war die überflüssige Aufbereitung eingebunden, in der das Uran abgetrennt und die verbrauchte Säure ergänzt wurde. Als Folge dieser Verfahrensweise befinden sich heute fast 2 Mill. m<sup>3</sup> schwefelsaurer Laugungslösung im Boden. Aufgrund der Schwerlöslichkeit der höheren Erdalkalisulfate ist im Prozess der Uranauflösung das im Uranerz anzutreffende Radium als Radium-Bariumsulfat im Sediment ausgeschieden worden und in der Grube verblieben. Seit Beendigung der Förderung 1991 bemüht man sich nun um die umweltgerechte Sanierung der Bergbauanlage, die im Wesentlichen in der gezielten Flutung der Grube besteht. Eine solche Flutung ist dringend geboten, um neben der energieaufwendigen Entwässerung und der damit verbundenen Abwasseraufbereitung auch den mit der Bewitterung verbundenen Austrag des Radiumtochternuklids Radon zu stoppen. Das Institut für Radiochemie des FZR trägt mit seiner praxisorientierten Forschung dazu bei, die Grundlagen der beteiligten, äußerst komplexen chemischen und mikrobiologischen Prozesse (siehe auch Beitrag S. 36 ff) zu

klären. Unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation wurden u.a. Fragestellungen zum Freisetzungsverhalten und Bindungsverhalten des Radiums in den Sedimenten bearbeitet und Prognosen zur Entwicklung der Aktivitätskonzentration des Radiums im Flutungswasser gestellt. Aufgrund dieser Studien konnte z.B. eine Radiumkontamination des Grundwasserreservoirs im Umfeld der Grube bei einer Flutung ausgeschlossen werden. Ein Forschungsergebnis, das unmittelbar umgesetzt wurde, nicht in Form eines Produktes und materiellen Gewinns, sondern langfristig gewinnbringend für Mensch und Umwelt.

Doch auch die wirtschaftliche Nutzung, selbst bahnbrechender wissenschaftlicher Ergebnisse, bedarf einer umsichtigen und vorausschauenden Planung, insbesondere, wenn der Technologievorsprung sehr groß ist oder bzw. und die Investitionskosten für die Verwertung der Technologie sehr hoch sind, wie dies bei Entwicklungen im Bereich der Halbleitertechnologie meist der Fall ist.

Durch gezielte Implantation von Germanium- oder Siliziumionen in Siliziumdioxid ist es Wissenschaftlern des Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung gelungen, Halbleiter-Nanocluster zu erzeugen, die beim Anlegen einer elektrischen Spannung blaues Licht emittieren. Noch vor rund 10 Jahren galt dies als prinzipiell unmöglich, da in Silizium und Germanium als sogenannter indirekter Halbleiter, strahlende Übergänge nur unter Beteiligung von Phononen auftreten können und infolge der geringen Bandlücke nur infrarotes Licht als Lumineszenz zu erwarten war. Zur Erzeugung von intensivem, sichtbarem Licht für elektrooptische Anwendungen war man auf die Verwendung von direkten Halbleitermaterialien wie Galliumarsenid beschränkt. Der Integration optischer und elektronischer Komponenten auf einen einzigen Siliziumchip waren prinzipielle Grenzen gesetzt.

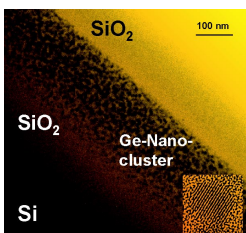
Mit der Entdeckung von „porösem Silizium“ durchbrach man diese prinzipielle Barriere und mit der in Rossendorf entwickelten Nanocluster-Technologie scheint die Erzeugung von elektrooptischen Bauelementen auf Siliziumbasis technisch umsetzbar, da die notwendigen Herstellungsschritte mit den konventionellen Prozessschritten der Chipproduktion kompatibel sind. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Wellenlänge des emittierten Lichts durch Variation

der Prozessschritte der jeweiligen Anwendung angepasst werden kann. Gegenwärtig wird am Institut ein Prototyp eines Optokopplers getestet, bei dem diese „Leuchtdiode in Siliziumtechnologie“ erstmals zum Einsatz kommt.

Ob das Rossendorfer Verfahren Eingang zur Erzeugung hochintegrierter, elektrooptischer Bauelemente in die industrielle Chipproduktion findet, bleibt abzuwarten. Die prinzipielle Idee der Erzeugung von Nanoclustern und Oberflächenvergütungen mit einem wirtschaftlich optimierten Verfahren wird aber in naher Zukunft sehr wahrscheinlich wirtschaftlich genutzt werden. Dieses Verfahren wird nämlich gegenwärtig mit der festen Vorgabe einer Unternehmensgründung durch einen jungen Doktoranden des FZR weiterentwickelt und optimiert. Als Teilnehmer am sächsischen Existenzgründerwettbewerb „Premiere '99“ konnte sich Thoralf Gebel bereits mit seinem Business-Plan gegen rund 60 Bewerber im Bereich „Mikroelektronik“ durchsetzen und gehört zu den drei Siegern der ersten Phase, die sich um das ausgelobte Preisgeld von 250.000 DM bewerben und das für die Gründung eines eigenen Unternehmens eingesetzt werden soll.

Materialforschung, Biomedizin-Chemie, Umweltforschung, Sicherheitsforschung, Kernphysik – das breit gefächerte, anwendungsorientierte Forschungsprofil der größten außeruniversitären Forschungseinrichtung der neuen Länder am sich rasant entwickelnden Hochtechnologie- und Wissenschaftsstandort Dresden ist eine Chance und Perspektive nicht nur für Sachsen. Einen Königsweg für den Forschungs- und Wissenstransfer gibt es jedoch auch hier nicht, vielmehr sind Kreativität, Ideen und Flexibilität gefragt, um immer wieder neue Wege zu beschreiten. Neu- oder Ausgründungen, Verbundprojekte mit industriellen und wissenschaftlichen Partnern, Auftragsforschung, die Übernahme von Serviceleistungen für ein Unternehmen durch die Forschungseinrichtung selbst oder der Know-how-Transfer durch die Ausbildung hochqualifizierter Mitarbeiter sind dabei gleichberechtigte Formen beim Ziel, neue Entwicklungen oder Technologien wirtschaftlich nutzbringend und sinnvoll umzusetzen.

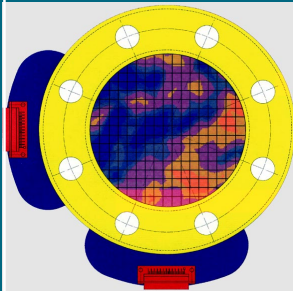
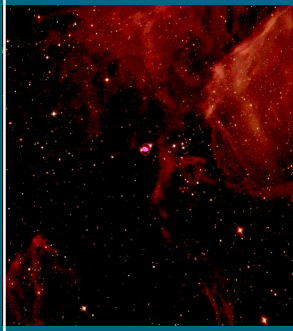
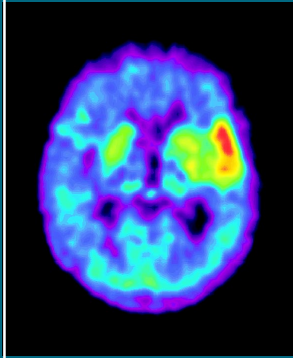
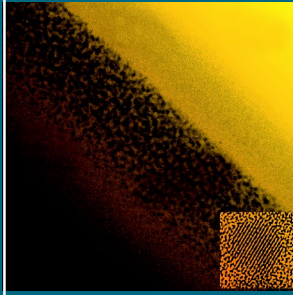
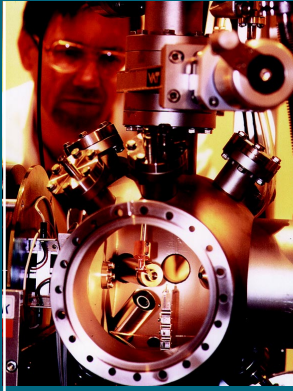
Jürgen Leib



**Abb. 7**  
Germanium-Nanocluster im Siliziumdioxid auf einem Siliziumsubstrat

#### Ansprechpartner

Dr. Johannes v. Borany  
Institut für Ionenstrahlphysik  
Tel. (0351) 260 33 78  
Fax (0351) 260 32 85  
e-Mail:  
J.v.Borany@fz-Rossendorf.de



# DATEN UND FAKTEN

---

**Abbildungen Seite 61 von oben nach unten:**

**Hochenergie-Ionen-Mikrosonde**

Das Bild zeigt die geöffnete Analysenkammer der Hochenergie-Mikrosonde am Tandetron-Beschleuniger des Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung. In dieser Kammer wird mit Hilfe eines fokussierten Ionenstrahls die chemische Elementverteilung in Festkörpern mit einer hohen örtlichen Auflösung im Bereich weniger Mikrometer gemessen. Beispiele sind der Nachweis von Spurenelementen in geologischen und biologischen Proben oder die Untersuchung von Materialien für Fusionsreaktoren.

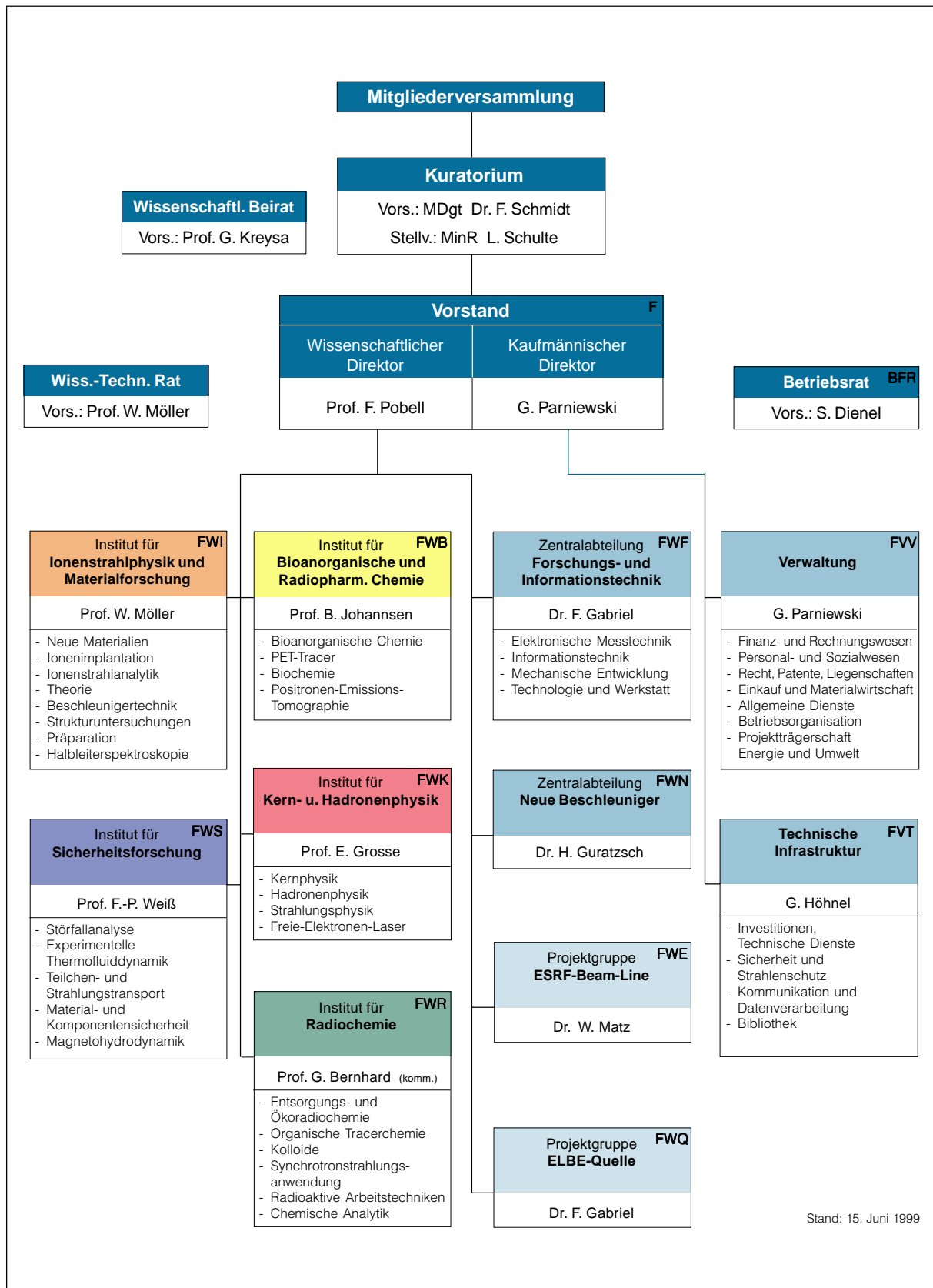
Die Querschnitts-TEM-Aufnahme zeigt durch Ionenstrahlsynthese erzeugte kristalline Ge-Halbleitercluster in einer amorphen  $\text{SiO}_2$ -Matrix.

Charakterisierung gestörter regionaler Hirnfunktionen mit Hilfe der Positronen-Emissions-Tomographie (s. Beitrag S. 29 ff).

Fotografie der Umgebung einer Supernova vom Typ II einige Jahre nach der Explosion (Quelle: Hubble Space Telescope, s. Abb. 7, S. 53). Ein Beispiel der Verbindung zwischen Mikro- und Makrokosmos wird im Beitrag „Seltsame Kaonen, hadronische Materie und kosmische Phasenübergänge“ diskutiert.

Schematische Darstellung eines Gittersensors zur Visualisierung von Zwei-Phasen-Strömungen in Pipelines mit der Auflösung von  $16 \times 16$  Bildpunkten bei 1024 Bildern pro Sekunde. (s. S. 58)

# ORGANIGRAMM



# ORGANE UND GREMIEN

---

Das Forschungszentrum Rossendorf e.V. (FZR) wurde am 6.12.1991 als gemeinnütziger Verein gegründet. Es wird als Einrichtung der „Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz“ vom Bundesminister für Bildung und Forschung (Bund) und den Ländern im Verhältnis 50 : 50 gefördert.

## Mitgliederversammlung

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

## Kuratorium

Das Kuratorium ist das umfassende Aufsichtsorgan. Es entscheidet 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 bestand am Ende des Berichtszeitraums aus folgenden Mitgliedern:

MDgt Dr. Frank Schmidt (Vorsitzender)	Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
MinR Lothar Schulte (Stellv. Vorsitzender)	Bundesministerium für Bildung und Forschung
MR Dr. Ronald Werner	Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
ROR Stefan Rix	Sächsisches Staatsministerium der Finanzen
Dr. Gert Bernhard	Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Prof. Dr. Peter Fulde	Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme

## Vorstand

Der Vorstand des FZR setzt sich wie folgt zusammen:

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



---

## Wissenschaftlicher Beirat

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

Prof. Gerhard Kreysa (Vorsitzender)	DECHEMA Frankfurt
Prof. Bernd Stritzker (Stellv. Vorsitzender)	Universität Augsburg
Prof. Günter Keßler	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Prof. Axel Kleemann	Asta Medica AG Frankfurt
Prof. Wolfgang Kröger	PSI Villigen
Prof. Achim Mehlhorn	Technische Universität Dresden
Prof. Vadim Ivanovich Nefedov	Institut für Allgemeine und Anorganische Chemie, Moskau
Prof. August Schubiger	PSI Villigen
Prof. Dirk Schwalm	Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
Prof. Hans Warlimont	Institut für Festkörper- und Werkstofforschung, Dresden.

## 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. Wolfhard Möller (Vorsitzender)	Dr. Ruprecht Fülle	Dr. Peter Merker
Dr. Horst-Michael Prasser (Stellv. Vorsitzender)	Dr. Hartmut Guratzsch	Dr. Harald Prade
Prof. Gert Bernhard	Prof. Eckart Grosse	Dr. Bernd Schmidt
Dr. Frank Gabriel	Prof. Bernd Johannsen	Prof. Frank-Peter Weiß

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

## Betriebsrat

Der Betriebsrat des Forschungszentrums Rossendorf setzt sich wie folgt zusammen:

Siegfried Dienel (Vorsitzender)	Christian Damm	
Jörg Voigtländer (Stellv. Vorsitzender)	Bernd Eisold	Steffen Schaller
Monika Bulenda	Bernd Hartmann	Christel Schneiderei
Dr. Harald Curian	Sabine Pfoertner	Dr. Rudi Wünsch

# ÜBERBLICK 1998/1. Halbjahr 1999

<b>Name:</b>	FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF e.V.	
<b>Träger:</b>	Freistaat Sachsen, Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst	
<b>Finanzierung:</b>	Grundfinanzierung: 50% Freistaat Sachsen (Bund) 50% Bundesrepublik Deutschland (Land)	
<b>Planstellen:</b>	421; davon 121 Wissenschaftlerstellen (31.12.1998)	/ 420; davon 121 Wissenschaftlerstellen (30.06.1999)
<b>Drittmittelstellen:</b>	118,63 Personenjahre (Ist 1998)	/ 60,59 Personenjahre (Ist 1. Hj. 1999)
<b>Doktoranden:</b>	46 (davon 13 Abschlüsse 1998) (31.12.1998)	/ 49 (davon 6 Abschlüsse 1. Hj. 1999)
<b>Grundfinanzierung:</b>	85.141,0 TDM	/ 86.309,8 TDM (für gesamtes Jahr)
<b>Sondermittel:</b>	4.406,5 TDM	/ 2.564,0 TDM (30.06.1999)
<b>Drittmittel:</b>	13.195,0 TDM	/ 13.168,0 TDM (30.06.1999)
<b>Organe:</b>	Mitgliederversammlung Kuratorium Vorstand Wissenschaftlicher Beirat	
<b>Wissenschaftliche Institute:</b>	Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie Institut für Radiochemie Institut für Sicherheitsforschung Institut für Kern- und Hadronenphysik	
<b>Wissenschaftliche Infrastruktur:</b>	Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik Zentralabteilung Neue Beschleuniger	
<b>Technische Infrastruktur:</b>	Investitionen, Technische Dienste Sicherheit und Strahlenschutz Kommunikation und Datenverarbeitung Bibliothek	

# ÜBERSICHT ÜBER DIE FORSCHUNGS- SCHWERPUNKTE UND -VORHABEN 1998/99

---

## Materialforschung

- Hartstoffschichten FWI
- Halbleitermaterialien FWI
- Nanocluster FWI
- Feinfokussierter Ionenstrahl FWI
- Plasma-Immersion-Implantation FWI
- Hochenergie-Ionenstrahlanalytik FWI
- Werkstoffe für Medizin und Biotechnologie FWI
- Materialsicherheit (Versprödungsmechanismen) FWS
- Simulation von Teilchen- und Strahlungsfeldern (Neutronenbelastung) FWS

## Biomedizin-Chemie, Umwelt

- Radiotracerdesign und Radiopharmazie FWB
- Transport und Metabolismus von Radiotracern FWB
- Radiopharmazeutische und biologische Untersuchungen zum serotonergen System FWB
- Dopaminerges System FWB
- Tumordiagnostik FWB
- Simulation von Teilchen- und Strahlungsfeldern (für PET-Schwerionentherapie) FWS
- Entwicklung und Bau von Detektoren (für PET-Schwerionentherapie) FWK
- Transportverhalten von Radionukliden in der Bio- und Geosphäre FWR
- Transport von Radionukliden durch Kolloide FWR
- Wechselwirkung von Radionukliden mit anthropogenen und natürlichen Organika FWR
- Wechselwirkung von Mikroorganismen mit Radionukliden und ihre molekulargenetische Charakterisierung FWR
- Strukturaufklärung von Radionuklidverbindungen mittels Synchrotronstrahlung FWR
- Chemie der schwersten Elemente FWR

## Grundlagenforschung zur Kern-, Hadronen- und Strahlungsphysik

- Strahlungsquelle ELBE FWK
- Forschung mit kohärenter Infrarotstrahlung FWK
- Nichtkonventionelle Photonenquellen FWK
- Biomedizinische Untersuchungen mit physikalischen Methoden FWK
- Kernphysik mit Bremsstrahlung FWK
- Kernstrukturuntersuchungen im Rahmen des EUROBALL-Projektes FWK
- Elektromagnetische Signale von Hadronensystemen und das HADES-Projekt FWK
- Strangeness in Hadronenreaktionen FWK

## Sicherheitsforschung

- Störfallanalyse FWS
- Thermofluidynamik FWS
- Material- und Komponentensicherheit FWS
- Sicherheit und Effektivität chemischer Prozesse FWS
- Teilchen- und Strahlungstransport FWS
- Magnetohydrodynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten FWS

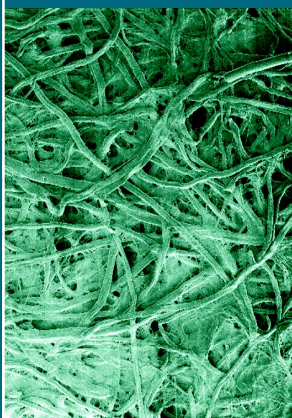
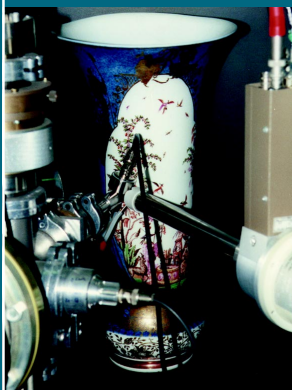
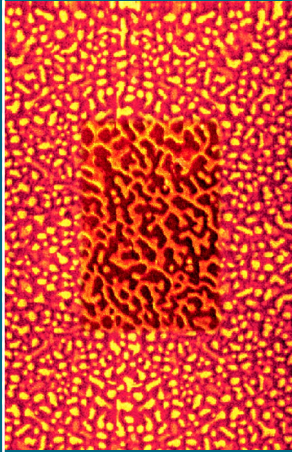
## Projekte

- ESRF-Beamline
- ELBE-Strahlungsquelle

# ÜBERSICHT ÜBER DIE ZENTRUMSÜBERGREIFENDE ZUSAMMENARBEIT 1998/99

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

Forschungsschwerpunkt	Gegenstand der Zusammenarbeit	beteiligt sind:
Biomedizin-Chemie, Umwelt	Positronen-Emissions-Tomographie <ul style="list-style-type: none"> <li>• In-situ-PET-Monitoring für die Schwerionen-Tumortherapie,</li> <li>• PET-Verfahren zur Dichte- und Konzentrationsmessung in der Strömungsmechanik</li> </ul>	FWK FWB FWS FWN
	Radioaktive Tracer in Bio- und Ökosystemen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemie des Technetiums</li> <li>• Chemie der Actinide</li> <li>• Molekülstrukturanalyse radioaktiver Verbindungen</li> <li>• Untersuchungen zum Radionuklidtransport</li> <li>• Entwicklung, Herstellung und Anwendung von Zyklotron-Isotopen</li> <li>• Charakterisierung von Actinidverbindungen und deren Sorbaten auf Oberflächen</li> </ul>	FWB FWR FWS FWN FWI
	Medizinische Therapie <ul style="list-style-type: none"> <li>• Charakterisierung von kardiologischen Stents</li> </ul>	FWB FWI
Materialforschung	Strukturuntersuchungen mit Photonen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rossendorfer Beamline ROBL an der ESRF in Grenoble</li> <li>• Feinstrukturuntersuchungen am HASYLAB des DESY/Hamburg und an der ESRF/Grenoble</li> <li>• Röntgendiffraktometrie und -reflektometrie</li> <li>• SiC-Ausheilung mit hochintensiver IR-Strahlung</li> </ul>	FWI FWR FWS FWK FWF FWN FWE
	Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen an modifizierten Materialien und Werkstoffen	FWS FWI
Grundlagenforschung zur Kern-, Hadronen- und Strahlungsphysik	ELBE-Strahlungsquelle <ul style="list-style-type: none"> <li>• Planung, Design, Aufbau</li> <li>• Wissenschaftliches Programm</li> <li>• Vorbereitung von Experimenten</li> </ul>	FWK FWF FWN FWQ FWI



ÜBERBLICK

---

**Abbildungen Seite 69 von oben nach unten:**

Radioisotopenlabor für Werkstoffuntersuchungen.

Die Raster-Elektronen-Mikroskopie ermöglicht neben der Abbildung kleinster Oberflächenstrukturen auch die Analyse der Elementverteilung auf einer Oberfläche durch die sog. Auger-Elektronen-Analyse. Sie wird daher als ein Standardanalysewerkzeug bei der Materialforschung eingesetzt, wie hier bei der Modifizierung von Oberflächen mit Hilfe der Ionenimplantation.

Im Hintergrund:  $\beta$ - $\text{FeSi}_2$  Ausscheidungen in einer Siliziummatrix nach der Implantation von Eisenatomen in Silizium und einer sich anschließenden Temperung bei  $900^\circ\text{C}$ .

In der Mitte:  $\alpha$ - $\text{FeSi}_2$  Struktur in einer Siliziummatrix nach der Implantation von Eisenatomen in Silizium und einer sich anschließenden Temperung bei  $1150^\circ\text{C}$ .

Zerstörungsfreie Materialanalyse mit Hilfe eines an Luft geführten Protonenstrahls. Die Abbildung zeigt die kunsthistorische Untersuchung einer „Höroldt Vase“ aus der „Porzellansammlung Dresden“.

Aufnahme der Faserstruktur von Papier mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop. Dieses sehr saubere (Chromatographie-)Papier dient als Trägermaterial für eine nachfolgende Dotierung mit chemischen Elementen als Standard für die z.B. in der Materialforschung eingesetzte energiedispersive Röntgenanalyse. (Vergrößerungsfaktor: ca. 100)

# INSTITUT FÜR IONENSTRAHLPHYSIK UND MATERIALFORSCHUNG

---

## Überblick über die Zielstellung

Die zentralen Aufgaben des Institutes vereinen Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung auf den Gebieten der Modifizierung von Oberflächen und der Oberflächenanalytik mittels Ionenstrahlen. Den Empfehlungen des Deutschen Wissenschaftsrates folgend, hat sich das Institut zu einem überregionalen und internationalen Ionenstrahlzentrum entwickelt, welches neben den eigenen Forschungsarbeiten Universitäten, anderen Forschungsinstituten und der Industrie Dienstleistungen bzw. Technologietransfer hinsichtlich Ionenstrahl-techniken anbietet.

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

## Wichtigste Ergebnisse

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Institutes orientieren sich an sieben zentralen Themen aus den Bereichen der Neuen Materialien (Hartstoffschichten, Halbleitermaterialien, Nanocluster- und Medizintechnik) und der Neuen Verfahren (Feinfokussierter Ionenstrahl, Plasma-Immersion- und Niederenergie-Ionenimplantation und Hochenergie-Ionenstrahlanalytik). Aus der großen Zahl neuer und wesentlicher Ergebnisse der Jahre 1998/99 innerhalb der einzelnen Forschungsvorhaben sind einige hervorzuheben: Die innere Spannung in aufwachsenden Bornitrid-Schichten konnte durch ein neuartiges Echtzeit-in-situ-Verfahren mit bisher nicht erreichter Genauigkeit vermessen werden. Mit Hilfe

von Nanocluster-Lichtemittern, die ausschließlich durch Standard-Prozesse der Silizium-Technologie erzeugt wurden, wurde ein integrierter Optokoppler hergestellt. Ähnliche Nanocluster-Strukturen sind die Grundlage eines neuen Konzeptes für nichtflüchtige elektronische Speicher. Nach einem speziellen Temperprozess wurden die bisher höchsten Konzentrationen elektrisch aktivierter Al-Dotanten in Siliziumkarbid gefunden. Durch die Plasma-Immersionimplantation gelang eine tiefreichende Nitrierung von Aluminiumwerkstoffen. In zugeordneten Modell-experimenten, u.a. mit Hilfe der Echtzeit-in-situ-Ionenstrahlanalytik, wurden die entsprechenden Transportmechanismen identifiziert.

Die hohe Zahl an wissenschaftlichen Publikationen des Institutes resultiert in vielen Fällen aus intensiven Kontakten zu deutschen und ausländischen Partnern. Entsprechend besuchten zahlreiche Gäste aus dem In- und Ausland das Institut, wie auch seine Mitglieder an anderen Instituten als Gäste begrüßt wurden. Auch eine Reihe von Einladungen zu Vorträgen auf den wichtigsten internationalen Konferenzen des Fachgebiets beweist, dass das Institut sich zunehmend als eine der weltweit führenden Ionenstrahleinrichtungen etabliert.

Dies wird auch dadurch bestätigt, dass dem Institut die Organisation einer der größten internationalen Ionenstrahl-Konferenzen angetragen wurde. Das Institut richtet Ende Juli 1999 in Dresden die 14. Internationale Konferenz „Ion Beam Analysis“ gemeinsam mit der 6. Europäischen Konferenz „Accelerators in Applied Research and Technology“ mit etwa 400 Teilnehmern aus. Weiterhin wurde gemeinsam mit dem Hahn-Meitner-Institut Berlin im Jahre 1998 zum zweiten Male eine Sommerschule „Nukleare Sonden und Ionenstrahlen“ in Bad Blankenburg (Thüringen) abgehalten, an der 45 Studenten und 13 Dozenten teilnahmen.

Der wissenschaftliche Erfolg des Institutes gründet sich wesentlich auf das Engagement seiner jungen Forscher. Im Zeitraum Januar 1998 bis Juni 1999 wurden eine Diplomarbeit

und vier Doktorarbeiten mit z.T. hervorragenden Resultaten abgeschlossen.

Im Berichtszeitraum wurde eine Reihe neuer Projekte über den DAAD sowie von der DFG, dem SMWK und der EU eingeworben. In einigen dieser Projekte spielt die Kooperation mit der Industrie eine wesentliche Rolle. Herausragend ist jedoch die Aufnahme des Institutes in die Liste der von der Europäischen Kommission geförderten „Large Scale Facilities“ als „Center for the Application of Ion Beams in Materials Research (AIM)“. Damit wird Wissenschaftlern aus den Ländern der EU und ihren assoziierten Staaten ermöglicht, die Rossendorfer Einrichtungen kostenlos zu nutzen.

Nicht nur im Rahmen dieser Förderung haben Kooperationen im Bereich der Ionenstrahlanalyse ein weites Spektrum von Materialien zum Gegenstand und sind in Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Tribologie, Korrosionsbeständigkeit, Elektronik und Mikrosystemtechnik, Biomedizin, Informationstechnik, Energietechnik, Geologie, Anthropologie und Extraterrestrik einbezogen. Vom Ionenimplantations-Service des Institutes, einschließlich des fokussierten Ionenstrahles und der Plasma-Immersion-Implantation, profitierten etwa 50 Partner aus Forschung und Industrie.

Die Bauarbeiten am neuen Anbau des Institutes mit etwa 1300 m<sup>2</sup> Laborfläche wurden im Frühjahr 1998 abgeschlossen. Die Anlagen des Institutes konnten im Anschluss daran durch den Umzug zweier Ionenimplanter, zweier Anlagen zur Ionenstrahlgestützten Schichtabscheidung, der AES/XPS-Oberflächenanalytik sowie der Raster- und Transmissions-Elektronenmikroskopie erheblich konzentriert werden. Eine erste Experimentierkammer wurde in Betrieb genommen, die gleichzeitig vom 500-kV-Implanter und vom 3-MV-Tandetron zugänglich ist. Ein wesentlicher Teil des Anbaus ist ein neuer Reinraumbereich mit nasschemischen Anlagen, Temperöfen, Photolithographie sowie Anlagen zur Dünnschichtabscheidung und zum reaktiven Ionenätzen.

### **Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit**

Die Rossendorfer Beamline (ROBL) an der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble, die das Institut gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie betreibt, wurde im Juni 1998 offiziell eröffnet.

Mit dem Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie wurden gemeinsame Untersuchungen zur Beschichtbarkeit von metallischen Stents mit radioaktiven Rheniumverbindungen für die Restenoseprophylaxe durchgeführt. Das Ziel dieser Arbeiten ist die Ausarbeitung von einfachen Markierungsverfahren, die unmittelbar vor der intrakoronaren Implantation der Stents angewandt werden können.

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

Zusammen mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik und der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik plant das Institut neue Forschungsthemen, die den Elektronenbeschleuniger ELBE mit der dort verfügbaren Fern-Infrarotstrahlung nutzen werden. Mit diesem Institut hat darüber hinaus eine Zusammenarbeit zu speziellen Problemen der Röntgenoptik begonnen, wobei die gemeinsamen Experimente dazu an der Rossendorfer ESRF-Beam-Line durchgeführt werden.

Weitere thematische Verbindungen existieren zum Institut für Sicherheitsforschung (Verschleiß von Oberflächen) und zum Institut für Radiochemie (Analysen an Gesteinsproben aus Uranerzbergbaugebieten mittels der protoneninduzierten Röntgenemission (PIXE)).

### **Zusammenarbeit mit externen Partnern**

Alle im Folgenden dargestellten Forschungsthemen profitieren von der Zusammenarbeit mit anderen Instituten und der Industrie. Für die Entwicklung von Hartstoffschichten ist der wissenschaftliche Austausch mit dem Fh-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden, der TU Chemnitz, der Universität Stuttgart sowie den Universitäten Poitiers und Tokio fördernd, die an gleichen oder ähnlichen Systemen mit anderen Methoden arbeiten. Innerhalb zweier europäischer Netzwerke „Hard Carbon Based Coatings“ und „Defect Engineering of Advanced Semiconductor Devices“ bestehen Verbindungen zu wissenschaftlichen Einrichtungen in vier bzw. neun europäischen Staaten.



Die Untersuchungen zur Getterung metallischer Verunreinigungen in Si werden aufgrund ihrer hohen Anwendungsrelevanz jetzt in Kollaboration mit der Fa. Advanced Micro Devices in Dresden durchgeführt. Dazu kommen auf Wunsch des Industriepartners Testexperimente zur Strahlenfestigkeit höchstintegrierter Bauelemente am Neutronenstrahl des Rossendorfer Zyklotrons. Die Arbeiten zum Gettern und Defektengineering sind ohne die qualifizierte Zusammenarbeit mit dem Moskauer Zentrum für Materialanalyse (SIMS-Messungen) undenkbar. Die Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Photophysik/TU Dresden ist von eminenter Bedeutung für die Lumineszenzuntersuchungen an Si- und Germanischen SiO<sub>2</sub>-Schichten.

In Zusammenarbeit mit der Fernuniversität Hagen wurde ein entsprechender integrierter Optokoppler realisiert. Neue Speicherelemente, die auf ähnlichen Nanocluster-Strukturen beruhen, werden gemeinsam mit der Dresdner Firma ZMD entwickelt. Weitere wissenschaftliche Verbindungen zu den Grundlagen der Nanocluster-Erzeugung existieren mit dem Oak Ridge National Laboratory, dem Californian Institute of Technology, dem CNRS-CSNSM Orsay und der Ecole Polytechnique in Palaiseau. Die AMD Saxony Manufacturing GmbH nutzt die Erfahrungen des Institutes in Analytik und Hochenergie-Ionenimplantation in zunehmendem Maße. Die Arbeiten zu den attraktiven Anwendungsmöglichkeiten des Ionenmikrostrahls basieren auf Kooperationen mit dem FZ Jülich, der FhG-EAQD in Dresden und der Universität Athen. Arbeiten zum Siliziumkarbid werden gemeinsam mit der Universität Barcelona und der TU Ilmenau durchgeführt. Die Dotierungsuntersuchungen an SiC werden vor allem durch eine enge vertragliche Kooperation mit dem Daimler-Benz-Forschungszentrum in Frankfurt/Main gefördert.

Implantationsprozesse für Sensoren unter extremen Bedingungen werden im Rahmen eines BMBF-Projektes gemeinsam mit der FernUniversität Hagen untersucht. Kooperationspartner zur theoretischen Modellierung von Halbleiterprozessen sind die ETH Zürich, die Firmen Integrated Systems Engineering Zürich, IBM, Intel und Zentrum Mikroelektronik Dresden sowie das Fh-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme Dresden.

Die Aktivitäten zu den Anwendungsmöglichkeiten des Ionenmikrostrahls beinhalten Kooperationen mit dem FZ Jülich, der FhG-EAQD/Dresden, der Universität Athen und der TU Chemnitz. Von wesentlicher Bedeutung sind auch Ramanuntersuchungen zur Mikrostrahlinduzierten Si-Schädigung mit der Universität Jena sowie gemeinsame Arbeiten mit der ETH Zürich, der Universität Magdeburg und der Firma Orsay Physics zur Weiterentwicklung von Flüssigmetall-Ionenquellen.

Innerhalb eines EU-Verbundprojektes, das Ionentechniken für mechanische Anwendungen beinhaltet, bestehen Verbindungen zur Universität Leuven und zu mehreren Firmen in Europa. Zahlreiche Verbindungen bestehen zu kleinen und mittelständischen Unternehmen in Deutschland, die Oberflächenvergütungen betreiben. Aus den vielfältigen Kooperationen zur Ionenstrahlanalytik sind die gemeinsamen Untersuchungen an Materialien von Fusionsreaktoren mit dem Institut für Plasmaphysik Garching, dem FZ Karlsruhe und dem europäischen Tokamak JET und Analysen von Kunstgegenständen in Zusammenarbeit mit der Hochschule für Bildende Künste Dresden sowie mehreren europäischen Partnern im Rahmen eines COST-Projektes hervorzuheben.

## Forschungsvorhaben

- Hartstoffschichten
- Halbleitermaterialien
- Nanocluster
- Werkstoffe für Medizin und Biotechnologie
- Feinfokussierter Ionenstrahl
- Plasma-Immersion-Implantation
- Hochenergie-Ionenstrahlanalytik

## Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		77/75			Wissenschaftler			32/32			
Annexpersonal [Anzahl   Personenjahre]											
Postdoc	8/6	3/2	Doktoranden	9/7	5,6/3	Gastwissenschaftler	29/12	2,2/1,3	Hilfskräfte	16/13	2,1/3,3
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl   Personenjahre]											
Wissenschaftler	17/15	9,2/5,6	Technisches Personal	5/7	4,3/2,3	Gastwissenschaftler	22/6	3,0/1,2	Doktoranden	15/10	9,6/4,4
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		864,7/433,4			drittmittelfinanziert			261,4/59,6			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		8/5			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			130/57			
Artikel (referiert)		91/56			Diplomarbeiten			1/-			
Artikel (nicht referiert)		5/1			Doktorarbeiten			3/1			
Artikel im Eigenverlag		7/5			Patentanmeldungen			5/1			
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings/Workshops		1/2									

Direktor

Prof. Dr. W. Möller    Tel.: (0351) 260-2245    e-Mail: W.Moeller@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter	Abteilung	Tel.	e-Mail
Dr. J. von Borany	Industriekooperation	3378	J.Borany@fz-rossendorf.de
Dr. M. Friedrich	Beschleunigertechnik	3284	M.Friedrich@fz-rossendorf.de
Dr. R. Grötzschel	Ionenstrahlanalytik	2802	R.Groetzschel@fz-rossendorf.de
Dr. W. Matz	Strukturuntersuchungen	3122	W.Matz@fz-rossendorf.de
Dr. M. Posselt	Theorie	3279	M.Posselt@fz-rossendorf.de
Dr. E. Richter	Ionenimplantation	3326	E.Richter@fz-rossendorf.de
Dr. B. Schmidt	Präparation	2726	B.Schmidt@fz-rossendorf.de
Dr. W. Skorupa	Neue Materialien	3612	W.Skorupa@fz-rossendorf.de

# INSTITUT FÜR BIOANORGANISCHE UND RADIOPHARMAZEUTISCHE CHEMIE

---

## Überblick über die Zielstellung

Spezifische chemische Reaktionen im nano- und pikomolaren Konzentrationsbereich bilden in den Biowissenschaften die Grundlage vielfältiger Informations- und Regulationsmechanismen. Ihre Aufklärung sowie Nutzung zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken ist von eminenter Bedeutung in der modernen Medizin. Mit Hilfe radioaktiver molekularer Sonden (Radiotracer) lassen sich derartige biochemische Zusammenhänge und regionale Stoffwechselprozesse in einzigartiger, anderweitig nicht zugänglicher Weise durch bildgebende Verfahren erforschen. Die Zielstellung des Instituts leitet sich aus dieser Bedeutung ab. Durch Integration von chemischen, pharmazeutischen und pharmakologischen Arbeitsrichtungen sollen in grundlegenden Arbeiten neue Ansätze der radioaktiven Markierung und des Radiotracerdesigns erschlossen werden.

Das betrifft sowohl radiochemische Forschung und Radiotracerentwicklung für die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) als auch aus bioanorganischen Konzepten hervorgehende Beiträge für die breite nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie. Beide Arbeitsrichtungen stehen im engen Zusammenhang, so dass ihre gemeinsame Bearbeitung synergistische Effekte erwarten lässt. Ziel ist die Entwicklung von Radiotracern, die im nano- und pikomolaren Konzentrationsbereich mit Targetmolekülen in Form spezifischer Rezeptoren oder anderer spezifischer Bindungspartner wechselwirken.

Gegenwärtig stehen einerseits durch Neurotransmitter vermittelte Prozesse im Gehirn im Mittelpunkt, die in bisher noch wenig geklärter Weise bei einer Reihe von Erkrankungen beteiligt sind. Andererseits nehmen Projekte über tumorsuchende Radiotracer im Forschungsprogramm des Instituts einen immer stärkeren Umfang an. Sie knüpfen an Fortschritte der Biochemie und Molekularbiologie an und haben das Ziel, anderweitig nicht oder nicht so effektiv erreichbare Tumoren bzw. Metastasen auf systemischem Weg zu erfassen.

In anwendungsorientierter Forschung werden in dem gemeinsam mit dem Universitätsklinikum „Carl Gustav Carus“ der TU Dresden betriebenen PET-Zentrum Rossendorf entsprechende chemische und biologische Arbeiten bis zur klinischen Forschung fortgeführt. Darüber hinaus nimmt das PET-Zentrum Rossendorf auch im gewissen Umfang eine spezielle Aufgabe in der Patientenversorgung wahr.

## Wichtigste Ergebnisse

Vorangegangene Untersuchungen mit 6-[<sup>18</sup>F]Fluor-L-DOPA haben gezeigt, in welchem Maße enzymatische Veränderungen unter Sauerstoffmangel im Gehirn neugeborener Ferkel auftreten. Durch die radiochemische Synthese des Hauptmetabolits und Bestimmung seiner Kinetik im Gehirn konnte eine exakte Quantifizierung der mit 6-[<sup>18</sup>F]Fluor-L-DOPA in neugeborenen Ferkeln erhaltenen PET-Daten vorgenommen und die Arbeitshypothese bestätigt werden.

Radiochemische und biologische Untersuchungen zu 3-O-Methyl-6-[<sup>18</sup>F]Fluor-L-DOPA führten zu der Erkenntnis, dass diese Verbindung ein äußerst aussichtsreicher Kandidat für die bildgebende Erfassung von Hirntumoren ist. Die Verbindung erwies sich als geeignet, über einen für Aminosäuren spezifischen Transport die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden und sich in bestimmten Hirntumoren mit hohem Target-zu-Untergrund-Verhältnis anzureichern. Erster Einsatz des neuen Radiotracers am Patienten verlief erfolgreich.

Nachdem es zuvor mit Hilfe eines neuen Syntheseansatzes (das sog. 3+1-Konzept) gelungen war, Rhenium- und Technetiumkomplexe mit Affinität zu ZNS-Serotoninrezeptoren zu synthetisieren, wurde im Berichtszeitraum der nächste Meilenstein in Bezug auf eine möglichst hohe Rezeptoraffinität erreicht. Erstmals ist es gelungen, einen *in vitro* hochaffinen Tracer für einen Serotoninrezeptor (5-HT<sub>2A</sub>) zu synthetisieren und autoradiographisch an

Rattenhirnschnitten zu charakterisieren. Die Ergebnisse wurden auf der Internationalen Jahrestagung 1999 der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin ausgezeichnet.

Ein zentrales Problem für die bildgebende Beurteilung von Rezeptoren im Gehirn mit Hilfe des idealen Gammastrahlers Tc-99m ist die fehlende oder sehr geringe Hirnaufnahme von technetiumhaltigen Liganden. Um ein tieferes Verständnis des Transports durch die Blut-Hirn-Schranke zu erhalten, wurden im Vorjahr begonnene systematische Untersuchungen zu derartigen Zusammenhängen fortgesetzt. Nachdem der  $pK_a$ -Wert der Aminverbindung als eine wesentliche Größe für die Beurteilung der Hirnaufnahme erkannt wurde, konnte im Berichtszeitraum der Zusammenhang zwischen niedriger Basizität und hoher Hirnaufnahme an einer großen Anzahl von Komplexverbindungen gezeigt werden. Andererseits folgen aus den Untersuchungen, wie die Basizität von Aminogruppen durch die Position am Liganden und durch Einführung von Elektronenakzeptorgruppen beeinflusst werden kann. Für die gegebene Stoffklasse ist damit erstmalig ein rationaler Ansatz vorhanden, durch Berücksichtigung der ermittelten Einflussfaktoren und durch Molekülvariationen den Durchtritt durch die Blut-Hirn-Schranke gezielt verbessern zu können.

Ein vielversprechender alternativer Ansatz in der Technetiumchemie stellt ein im Paul Scherrer Institut, Schweiz, entwickeltes Konzept zur Verwendung eines Metallotricarbonylbausteins dar. In Zusammenarbeit mit diesem Institut wurde ein auf Thioetherbasis beruhendes Designkonzept für ZNS-Rezeptoraffine Technetiumkomplexe entwickelt. Gleichmaßen wurde ein über N-Donoratome koordinierter Komplex mit hoher Affinität für einen Serotoninrezeptor ( $5-HT_{1A}$ ) synthetisiert und charakterisiert. Damit konnte an drei Prototypen für verschiedene Rezeptoren erstmals der Metallotricarbonylansatz auf ZNS-Rezeptorliganden erfolgreich angewendet werden.

In Zusammenarbeit mit der Schering AG wurde ein gemeinsam zum Patent angemeldetes Verfahren entwickelt, um metallische Stents in der Klinik mit radioaktivem Rhenium zu beschichten. An derartige Stents werden große Erwartungen hinsichtlich einer Verringerung der Restenose nach Ballondilatation geknüpft. Die durchgeführten radiochemischen Arbei-

ten ermöglichen nun die klinische Prüfung der markierten Stents.

Im April 1998 wurde ein europäisches BIOMED2-Projekt über die Entwicklung neuer Peptid-Radiopharmaka für die rezeptor-assoziierte Tumordiagnostik und -therapie unter Leitung des Rossendorfer Instituts begonnen. In der internationalen Zusammenarbeit wurde eine große Serie an Neurotensinderivaten synthetisiert, mit einer Reihe von Radionukliden markiert und biologisch charakterisiert. Die im Projekt verbundenen Gruppen haben inzwischen die internationale Führungsposition auf diesem speziellen Forschungsgebiet der tumoraffinen Radiopharmaka übernommen.

### Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Seit langem besteht mit dem Institut für Radiochemie eine enge Zusammenarbeit auf strukturanalytischem Gebiet. Das betrifft primär die Aufklärung des Koordinationsverhaltens von Rhenium-, Technetium- und anderen Metallverbindungen durch gemeinsame Untersuchungen an externen Synchrotronrichtungen und seit kurzem ausschließlich am Rossendorfer Strahlrohr ROBL an der ESRF in Grenoble.

Mit dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung wurden im Berichtszeitraum gemeinsame Untersuchungen zur Beschichtbarkeit von metallischen Stents mit radioaktiven Rheniumverbindungen für die Restenoseprophylaxe durchgeführt. Das Ziel dieser Arbeiten ist die Ausarbeitung von einfachen Markierungsverfahren, die unmittelbar vor der intrakoronaren Implantation der Stents angewandt werden können.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik, das an dem Schwerionenprojekt bei der GSI Darmstadt beteiligt ist, wurden gemeinsame Untersuchungen zur Korrektur des Auswaschens der während der Bestrahlung mit hochenergetischen Schwerionen in den Patienten induzierten Aktivität durch Körperflüssigkeiten durchgeführt. Mit dem Ziel, die Präzision der Kontrolle der Bestrahlung zu verbessern, erfolgten sowohl PET-Perfusionsuntersuchungen der Patienten zwischen den Bestrahlungsintervallen am DKFZ Heidelberg als auch tierexperimentelle Studien im PET-Zentrum Rossendorf.

---

Die Zusammenarbeit mit dem Institut für Sicherheitsforschung betrifft die Anwendung von PET-Tracern zur Analyse des Stofftransportes in Zweiphasenströmungen.

### **Zusammenarbeit mit externen Partnern**

Der multidisziplinäre Charakter der Forschungsthematik verlangt eine ausgedehnte Zusammenarbeit mit externen Partnern.

Die umfangreichste Zusammenarbeit besteht mit der Technischen Universität Dresden. Neben der intensiven Kooperation im gemeinsam genutzten PET-Zentrum Rossendorf hat sich eine gute Zusammenarbeit mit anderen medizinischen Einrichtungen des Universitätsklinikums ergeben. Hervorzuheben ist die im Berichtszeitraum gewachsene Zusammenarbeit mit der Abteilung für Chirurgische Forschung über den Einsatz von Radiotracern für das Monitoring bei der Gentherapie. Mit verschiedenen chemischen Instituten der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften werden bioanalytische Themen bearbeitet, beispielsweise mit dem Institut für Analytische Chemie in Bezug auf die Verknüpfung von Infrarot-Spektroskopie und Radiotracer-technik bei der Charakterisierung von Tumorgewebe. Weitere Zusammenarbeit ist auf dem Gebiet der bioaktiven Substanzen im Entstehen, wo-

bei sich chemische, biologische und medizinische Gruppen zu einem entsprechenden Forschungsprogramm zusammengeschlossen haben.

Langjährige Kooperationen auf analytischem Gebiet bestehen auch mit der Bundesanstalt für Materialforschung Berlin.

Biochemische Aspekte der Hirnschädigung werden seit längerem erfolgreich mit dem Institut für Pathophysiologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena bearbeitet. Mit dem Hans-Knöll-Institut in Jena besteht ebenfalls eine intensive Zusammenarbeit, wobei Fragen der Steroidchemie und -pharmakologie im Mittelpunkt stehen.

Gemeinsame Forschungsvorhaben mit der Pharmaindustrie beziehen sich auf radiopharmazeutische Aspekte (Schering AG, Berlin; Mallinckrodt, USA/Holland; ASTA MEDICA Frankfurt).

Die in einem COST-Programm bzw. Biomed-Projekt verankerte Zusammenarbeit mit europäischen Partnern besteht besonders intensiv zu dem „Demokritos“ National Research Centre for Physical Sciences in Athen, Griechenland und dem Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.

### **Forschungsvorhaben**

- Radiotracerdesign und Radiopharmazie
- Transport und Metabolismus von Radiotracern
- Radiopharmazeutische und biologische Untersuchungen zum serotonergen System
- Dopaminerges System
- Tumordiagnostik

## Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		38/38			Wissenschaftler			15/15			
Annexpersonal [Anzahl   Personenjahre]											
Postdoc	5/4	2,3/0,9	Doktoranden	6/4	3,6/2	Gastwissenschaftler	5/2	0,4/0,1	Hilfskräfte	11/6	3,1/1
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl   Personenjahre]											
Wissenschaftler	9/7	5,3/2,5	Technisches Personal	2/2	0,9/0,6	Gastwissenschaftler	2/3	0,1/0,3	Doktoranden	4/2	1,8/1
Stipendiaten	-/2	5,3/0,3									
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		1.152,7/17			drittmittelfinanziert			133,5/20,6			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		2/12			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			40/27			
Artikel (referiert)		16/16			Diplomarbeiten			3/-			
Artikel (nicht referiert)		-/-			Doktorarbeiten			3/3			
Abstracts		14/23			Patentanmeldungen			2/3			
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		2/1									

Direktor

Prof. Dr. B. Johannsen Tel.: (0351) 260-3170 e-Mail: B.Johannsen@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter	Abteilung	Tel.	e-Mail
Dr. H. Spies	Bioanorganische Chemie	3678	H.Spies@fz-rossendorf.de
Dr. J. Steinbach	PET-Tracer	2760	J.Steinbach@fz-rossendorf.de
Dr. P. Brust	Biochemie	3452	P.Brust@fz-rossendorf.de
Prof. Dr. W. Burchert (bis Frühjahr 1999)	PET		W.Burchert@fz-rossendorf.de

## Überblick über die Zielstellung

Die wissenschaftliche Zielstellung des Instituts für Radiochemie ist die Erforschung des Radionuklidtransports in der Geo- und Biosphäre.

Dieser Transport wurde bisher meist nur makroskopisch beobachtet und phänomenologisch beschrieben. Das grundlegende Forschungsziel des Instituts dagegen ist es, die ablaufenden Vorgänge in Einzelprozesse zu zerlegen und diese auf molekularer Ebene aufzuklären. Unter Verwendung bestehender und noch zu entwickelnder Transportmodelle wird es möglich, aus der mikroskopischen Information makroskopische Voraussagen abzuleiten. Für die Grundlagenforschung ergeben sich methodische Ansätze, besonders im Hinblick auf die Bestimmung der Speziation und Migration der radioaktiven und weiterer relevanter Schwermetalle in Wässern auch unter dem Aspekt der Wechselwirkung mit anthropogenen und natürlichen Organika, der Bildung von Kolloiden und des Einflusses von Mikroorganismen.

Die Forschung umfasst mittelfristig insbesondere die Beschreibung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe über Grund- und Oberflächenwässer. Es werden unter anderem die Wechselwirkungen an der Phasengrenzfläche zwischen wässriger Phase und Gesteinen, Mineralen und Böden, die Bildung und Ausbreitung von Kolloiden sowie die Mobilisierung oder Retardierung der Radionuklide in Abhängigkeit von deren Speziation untersucht. Dabei stehen die Laborexperimente mit den Experimenten im Feld in engem Zusammenhang. Ziel der mikrobiologischen Forschungen des Instituts ist es, den Einfluss von Mikroorganismen auf das Ausbreitungsverhalten von Radionukliden aufzuklären und Grundlagen für Bioremediationsverfahren zu erarbeiten.

Auf der Basis der erarbeiteten Daten kann die Radionuklidmigration in der Umwelt besser prognostiziert werden. Diese Voraussagen sind wesentlich für die Entwicklung geeigneter Sanierungstechnologien für kontaminierte Flächen, die zum Beispiel als Altlasten des Uranerzbergbaus in Sachsen und Thüringen, als weitflächige Kontaminationen in den Nachfolgestaaten der früheren Sowjetunion und den USA, resultierend aus der Kernwaffenentwicklung und -produktion, und als kontaminier-

te Gebiete durch Nuklearunfälle vorliegen. Eine umfassende Kenntnis der Radionuklidmigration ist wesentlich für eine Abschätzung der radioökologischen Konsequenzen für Mensch und Umwelt bei der Auswahl, Durchführung und nach der Beendigung von Sanierungsmaßnahmen und für die Risikoanalyse von nuklearen Endlagern.

Durch die Inbetriebnahme des neuen radiochemischen Laborgebäudes und des radiochemischen Messplatzes am Strahlrohr ROBL der ESRF ist das Institut mittelfristig in der Lage, seine grundlagenchemischen und radioökologischen Forschungen auf die Elemente Neptunium, Curium, Americium, Plutonium, aber auch Technetium und Radium zu erweitern.

## Wichtigste Ergebnisse

Es ist auf zwei herausragende Ereignisse im Jahr 1998 hinzuweisen, die die methodischen Forschungsmöglichkeiten des Instituts entscheidend erweiterten:

1. Das Rossendorfer Strahlrohr ROBL an der ESRF in Grenoble, einschließlich seines radiochemischen Messplatzes, konnte in Betrieb genommen werden.
2. Im neuen radiochemischen Laborgebäude begannen die Experimente mit radioaktiven Nukliden, einschließlich der Actinide.

Im Mittelpunkt der Arbeiten am radiochemischen Messplatz ROBL standen zunächst die Erprobung und Inbetriebnahme aller Komponenten. Dazu gehörten das spezielle radiochemische Sicherheitssystem, die Handschuhbox mit den in ihr befindlichen Probenpositioniersystemen und die zur Messung der Röntgenabsorptionsspektren erforderlichen Detektoren. Es war dem Institut erstmalig möglich, wässrige Neptuniumkomplexverbindungen in den Oxidationsstufen Np(IV), Np(V) und Np(VI) zu präparieren und anschließend am Rossendorfer Synchrotronstrahlrohr zu untersuchen. Die in den Np L<sub>I</sub>- und L<sub>III</sub>-Kante XANES-Spektren beobachteten Abhängigkeiten der Linienform und -intensität und der chemischen Verschiebung der Absorptionskante als Funktion des Oxidationszustandes erlauben eine Identifizierung des Neptuniums in zukünftigen Proben. Auch die aus den Np L<sub>III</sub>-Kante EXAFS-Spektren ermittelten Strukturparameter

wie Koordinationszahlen und Bindungsabstände zeigen eindeutige Abhängigkeiten vom Oxidationszustand des Neptuniums.

Bei Modellversuchen an einer 0,1 M Pertech-netatlösung konnte das Technetium-K-Kante EXAFS-Spektrum über den 2,5-fachen Energiebereich eines gewöhnlichen EXAFS-Spektrums gemessen werden. Dieser Rekord demonstriert nicht nur die ausgezeichnete Qualität der entsprechenden Ausrüstungen von ROBL und der ESRF, sondern erlaubt auch den Schluss, dass für Technetiumverbindungen das Vermögen der EXAFS-Spektroskopie, benachbarte Atome als einzelne Koordinationsschalen aufzulösen, besonders hoch ist.

Hervorzuhebende Ergebnisse sind auf dem Gebiet der Synthese und der Wechselwirkung von Huminsäuren mit Uran zu verzeichnen. Durch vergleichende Untersuchungen von Modellhuminsäuren mit blockierten phenolischen OH-Gruppen und den entsprechenden unblockierten Huminsäuren konnte zum ersten Mal gezeigt werden, dass schon bei pH 4 freie phenolische OH-Gruppen von Huminsäuren als Elektronen-Donatoren in den Komplexbildungsprozess des  $UO_2^{2+}$  einbezogen werden und intramolekular Wasserstoffbrücken zwischen den Wasserstoffatomen der OH-Gruppe und den Sauerstoffatomen der Uranylionen ausgebildet werden.

Es ist durch geeignete Syntheseführung gelungen, Kohlenstoff-14-markierte Modell-Huminsäuren in solchen spezifischen Radioaktivitäten herzustellen, welche die Ausführung kinetischer Experimente im umweltrelevanten Konzentrationsbereich zulassen. Untersuchungen zu den kolloidalen Eigenschaften von Huminsäuren mittels Kombination von Rasterkraftmikroskopie und Photonen-Korrelations-Spektroskopie erhärteten das Ergebnis, dass in wässrigen Lösungen zwei Arten von Huminsäurepartikeln vorliegen. Ihr Verhalten bei Änderung des pH-Wertes der Lösung kann mit dem Random-Coil-Modell beschrieben werden.

Nach der Flutung der stillgelegten Uranerzgruben unterliegt das eingebaute Holzinventar der Zersetzung. Infolge dieser Abbauprozesse kommt es einerseits zur Veränderung der Redoxsituation im Grubenwasser und andererseits zur Entstehung von organischen Abbauprodukten, die komplexierend auf das Uran wirken können. Es konnte mittels photoakustischer Laserspektroskopie und auch UV-vis-Spektroskopie erstmals nachgewiesen werden, dass aus dem Holzabbau herrühren-

de Ligninstoffe unter diesen Bedingungen Uran(VI) zu Uran(IV) reduzieren und somit zur Immobilisierung des Urans beitragen können. In Boden- und Wasserproben aus Halden und Tailings des ehemaligen Uranerzbergbaues konnten dominante Bakterienstämme nachgewiesen werden, die zu den Gattungen *Bacillus*, *Desulfovibrio*, *Lep-tospirillum* und *Thiobacillus* gehören. Diese wurden aus Bodenproben isoliert und charakterisiert. Drei *Bacillus*-Haldenisolat zeigen eine hohe Bioakkumulation von Uran und anderen Schwermetallen. Zum ersten Mal wurde eine Mikrodiversität zwischen den Stämmen der Art *Thiobacillus ferrooxidans* demonstriert. Weiterhin konnte die irreversible Bioakkumulation von U(VI) an acidophilen *T. ferrooxidans*-Stämmen wie auch an *Bacillus*-Halden-Isolaten (*B. cereus*; *B. megaterium*; *B. sphaericus*) bestimmt werden. Die Auswertungen der Laserfluoreszenz- und röntgenspektroskopischen Messungen deuten auf eine Komplexbildung des gebundenen Urans als Phosphatkomplex hin.

Das Verständnis der Sorption von Uran auf dem Gestein Phyllit konnte substantiell vertieft werden. Basierend auf Sorptionsuntersuchungen an den bildenden Mineralen kann nun das Sorptionsverhalten von Uran auf Phyllit gut vorhergesagt werden. Die für die Modellierung mit dem „Diffuse Double Layer (DDL)-Modell“ benötigten Parameter spezifische Oberfläche, Dichte der Oberflächenbindungsplätze und Protolysekonstanten wurden für die mineralogischen Hauptbestandteile des Phyllits experimentell bestimmt. Unter Anwendung des DDL-Modells und des Computerprogramms FITEQL wurden aus experimentellen Sorptionsdaten erstmals die Oberflächenkomplexbildungskonstanten für die mineralogischen Hauptbestandteile des Gesteins Phyllit berechnet.

Die Anbindung von geochemischen Speziationen an Software zur Risikobewertung bei nuklearen Kontaminationen wurde für zwei Anwendungsfälle (Drigg Site in Großbritannien und Ranstad Tailing in Schweden) erfolgreich getestet. Um die Verteilungskoeffizienten ( $K_d$ -Werte) durch realistischere Oberflächenkomplexbildungsmodelle zu ersetzen, wurde eine entsprechende thermodynamische Datenbank aufgestellt und für die Nutzung mit MINTEQA2 implementiert.

Die von der Rossendorfer Gruppe entwickelte Methode der Hochtemperatur-on-line-Gaschromatographie von Oxidhydroxiden wurde erstmalig erfolgreich zur physiko-chemischen



mischen Charakterisierung des Elements 106, Seaborgium, eingesetzt.

Das Institut organisierte im Berichtszeitraum drei äußerst erfolgreiche Konferenzen. Die „Vortragstagung der Fachgruppe Nuklearchemie der GDCh“ (September 1998, 170 Teilnehmer aus 6 Ländern), die „Euroconference and NEA Workshop on Speciation, Techniques, and Facilities for Radioactive Materials at Synchrotron Light Sources“ (Oktober, 1998, 100 Teilnehmer aus 13 Ländern) und die „Euroconference on Bacterial-Metal/Radionuclide Interaction: Basic Research and Bioremediation“ (Dezember 1998, 100 Teilnehmer aus 10 Ländern). Außerdem war das Institut Gastgeber des 5. EU-Projektmeetings „Effects of Humic Substances on the Migration of Radionuclides“ (Mai 1999, 24 Teilnehmer aus 9 Ländern).

### Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Innerhalb der zentrumsübergreifenden Forschungs- und Entwicklungsarbeit konnte der Aufbau des Strahlrohres ROBL an der ESRF, der in enger Kooperation zwischen dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung, dem Institut für Radiochemie und der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik erfolgte, abgeschlossen werden. Um einen kontinuierlichen Messbetrieb an ROBL zu sichern, ist auch weiterhin eine enge Kooperation zwischen diesen drei Organisationseinheiten erforderlich.

Mit dem Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie besteht eine enge Zusammenarbeit auf strukturanalytischem Gebiet. Das betrifft insbesondere die Aufklärung des Koordinationsverhaltens von Rhenium- und Technetiumverbindungen. Da die für die radiopharmazeutische und umweltchemische Forschung interessanten Technetium-99-Komplexe nur in Ausnahmefällen als Einkristalle synthetisiert werden können, kommt der EXAFS-Spektroskopie am Radiochemiemessplatz bei ROBL eine Schlüsselrolle bei der Strukturaufklärung zu.

Ein weiterer Schwerpunkt der Zusammenarbeit mit dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung aber auch mit dem Institut für Sicherheitsforschung ist die umfassende Charakterisierung des benötigten Geomaterials, synthetisierter Modellverbindungen und Partikel, die eine unabdingbare Voraussetzung für das Studium des Sorptionsver-

haltens von Actiniden an diesen Materialien bildet. Die Bewertung von physiko-chemischen Daten und Modellen hinsichtlich der Beschreibung der Uranmigration in Bergbauhalden ist das Thema der Zusammenarbeit mit dem Institut für Sicherheitsforschung.

In Vorbereitung der Experimente zur chemischen Charakterisierung des Seaborgiums wurden Simulationsexperimente mit kurzlebigen Isotopen in Kooperation mit der Zentralabteilung Neue Beschleuniger durchgeführt.

Innerhalb einer Arbeitsgruppe zwischen dem Institut für Kern- und Hadronenphysik, der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik, der Zentralabteilung Neue Beschleuniger und dem Institut für Radiochemie sind die technischen und wissenschaftlichen Vorarbeiten zur Nutzung des Freie-Elektronen-Lasers für die radiochemischen Fragestellungen der Wechselwirkung von Actinidelementen mit Gesteinsoberflächen, Mikroorganismen und Biomolekülen angelaufen.

### 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 zu den Themen „Einfluss von Huminsubstanzen auf den Transport von Radionukliden“, „Erarbeitung von Sanierungsstrategien für radioaktiv belastete Flächen (RESTRAT)“ und Erarbeitung einer „Thermodynamischen Datenbasis zur Umweltmodellierung (JETDEM)“ mit 16 verschiedenen Instituten aus 7 europäischen Ländern kooperiert.

Der Einfluss von Huminstoffen auf das Migrationsverhalten radioaktiver und nicht-radioaktiver Stoffe unter naturnahen Bedingungen ist das Thema der Zusammenarbeit mit dem Institut für Kernchemie der Universität Mainz, dem Anorganischen und Analytischen Institut der Universität des Saarlandes und dem Institut für Nukleare Entsorgungstechnik des Forschungszentrums Karlsruhe.

Die fruchtbare Zusammenarbeit mit der Actinide Chemistry Group des LBNL wurde während der gemeinsamen EXAFS-Messungen am Synchrotron in Stanford im Rahmen eines NATO-Projektes fortgesetzt.

Die Zahl der Partner, die in wissenschaftlicher Zusammenarbeit mit dem Institut Messungen an Radionukliden bei ROBL durchführen, nahm ständig zu. Genannt seien das Paul-

Scherrer-Institut, Villigen, Schweiz, The Royal Institute of Technology in Stockholm, das Institute de Recherches Subatomiques in Strasbourg, das Commissariat à l'Energie Atomique Cadarache und das Institute Physique Nucleaire in Paris.

Eine mehrjährige und intensive Zusammenarbeit besteht mit dem Kurnakov- und dem Kurchatov-Institut in Moskau bei der Oberflächenanalytik mittels ESCA. Diese wurde zuletzt für die Untersuchung der Wechselwirkung von Eisen und Uran mit Huminsäuren eingesetzt.

Die mikrobiologischen Arbeiten zur Ermittlung der bakteriellen Diversität in den Halden und Tailings des Uranerzbergbaues erfolgen in enger wissenschaftlicher Kooperation mit dem Umweltforschungszentrum Leipzig, Sektion Sanierungsforschung und Wissenschaftlern des Lehrstuhls für Geomikrobiologie der Universität Sofia, Bulgarien und des Instituts für Molekulare Biologie der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften in Sofia, Bulgarien.

Auf den Gebieten der Gesteinscharakterisierung und der Sorption von Actiniden an Gesteins- und Mineraloberflächen wurde intensiv mit dem Institut für Geologie der TU Bergakademie Freiberg, dem Institut für Anorganische und Analytische Chemie der Universität Frankfurt/M., dem Institut für Mineralogie der Universität Münster und dem Institut für Bodenkunde der Technischen Universität München kooperiert.

Koordinationschemische Grundlagenuntersuchungen zur Struktur der Elemente Uran, Thorium und Technetium, die dem Verständnis des Verhaltens dieser Elemente in natürlichen Systemen dienen, werden in Zusammenarbeit (neben FWB) mit Arbeitsgruppen der Universitäten Tübingen, Leipzig, Oxford (UK), Santa Maria (Brasilien), Montevideo (Uruguay) und dem Paul-Scherrer-Institut Villigen (Schweiz) durchgeführt.

Mit der Thematik „Charakterisierung der Kolloidpartikel in den Wasserfließsystemen sächsischer Bergbauanlagen“ sind die Kolloidforschungen des Instituts in das Schwerpunktprogramm der DFG „Geochemische Prozesse mit Langzeitfolgen im anthropogen beeinflussten Sickerwasser und Grundwasser“ eingebunden. Bei dieser Thematik wird insbesondere mit Arbeitsgruppen der TU Bergakademie Freiberg, der Universität Göttingen und dem Institut für Wasserforschung Schwerte zusammengearbeitet.

Eine umfangreiche Zusammenarbeit besteht mit verschiedenen Instituten der Technischen Universität Dresden. Mit dem Institut für Analytische Chemie wurde innerhalb eines Projekts die Thematik „Untersuchung des Einflusses der in Grubenwässern gelösten organischen Verbindungen auf den Valenzzustand von Radionukliden und toxischen Schwermetallen im Hinblick auf den Flutungsprozess der sächsischen Uranbergwerke“ und dem Institut für Pflanzen- und Holzchemie das Thema „Untersuchung des Grubenholzabbaus und Einflussnahme der freigesetzten organischen Stoffe auf den chemischen Zustand und das Migrationsverhalten von Radionukliden und toxischen Schwermetallen“ bearbeitet.

Die Modellierung von Alpha-Spektren (Institut für Strahlenschutzphysik), die Visualisierung von Kolloiden und die Nutzung von bakteriellen S-Layern zu Konstruktion von Nanostrukturen (Institut für Werkstoffwissenschaften) und die Bestimmung von Transferfaktoren Boden/Pflanze (Institut für Pflanzen- und Holzchemie) sind weitere gemeinsame Forschungsgebiete. Die Arbeiten zur Chemie des Seaborgiums sind in eine internationale Kollaboration integriert, die getragen wird von der GSI Darmstadt, der Universität Mainz, dem PSI Villigen und dem VIK Dubna.

### **Forschungsvorhaben**

- Transportverhalten von Radionukliden in der Bio- und Geosphäre
- Transport von Radionukliden durch Kolloide
- Wechselwirkung von Radionukliden mit anthropogenen und natürlichen Organika
- Wechselwirkung von Mikroorganismen mit Radionukliden und ihre molekulargenetische Charakterisierung
- Strukturaufklärung von Radionuklidverbindungen mittels Synchrotronstrahlung
- Chemie der schwersten Elemente

## Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		39/38			Wissenschaftler			16/16			
Annexpersonal [Anzahl   Personenjahre]											
Postdoc	4/5	3/1,9	Doktoranden	5/3	3,8/1	Gastwissenschaftler	14/1	1/-	Hilfskräfte	7/1	0,8/0,1
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl   Personenjahre]											
Wissenschaftler	18/15	10,5/4	Technisches Personal	6/8	2,2/1,8	Stipendiaten	-/1	-/0,3	Doktoranden	5/4	4,2/2
Gastwissenschaftler	5/3	0,3/0,8	Studentische Hilfskr.	2/2	0,5/0,5	Postdoktoranden	1/1	1/0,5			
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		896,4/423,8			drittmittelfinanziert			2,5/42,9			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		7/9			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			101/35			
Artikel (referiert)		49/21			Diplomarbeiten			-/-			
Artikel (nicht referiert)		-/-			Doktorarbeiten			-/-			
Tagungsabstracts		4/2			Patentanmeldungen			2/-			
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		3/2									

### Direktor

Prof. Dr. H. Nitsche Tel.: (0351) 260-32 10  
(bis 31. 10. 1998)

e-Mail: H.Nitsche@fz-rossendorf.de

Prof. Dr. G. Bernhard Tel.: (0351) 260-32 80  
(kommissarisch ab 1. 11. 1998)

e-Mail: G.Bernhard@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter	Abteilung	Tel.	e-Mail
Prof. Dr. G. Bernhard	Entsorgungs- und Ökoradiochemie	32 80	G.Bernhard@fz-rossendorf.de
Dr. K.-H. Heise	Organische Tracerchemie	27 12	H.Heise@fz-rossendorf.de
Dr. T. Reich	Synchrotronstrahlungsanwendungen	27 39	T.Reich@fz-rossendorf.de
Dr. P. Merker	Kolloide	31 56	P.Merker@fz-rossendorf.de
Dr. K. Krogner	Analytik	31 33	K.Krogner@fz-rossendorf.de
B. Eisold	Radioaktive Arbeitstechniken	36 17	B.Eisold@fz-rossendorf.de

## Überblick über die Zielstellung

Im Institut für Kern- und Hadronenphysik wird einerseits Grundlagenforschung in den Bereichen Hadronen-, Kern- und Strahlungsphysik betrieben, andererseits wird die Übertragungsmöglichkeit von deren Methoden und Ergebnissen in Gebiete außerhalb der subatomaren Physik untersucht. Die Dynamik von Nichtgleichgewichtssystemen und die Kopplung solcher Systeme an elektromagnetische Strahlung wird für hadronische und nukleare Prozesse sowohl experimentell als auch theoretisch bearbeitet. Ähnliche Nichtgleichgewichtssphänomene treten z. B. bei der Wechselwirkung intensiver Infrarot-Strahlungsfelder mit kondensierter Materie auf. Im experimentell-technischen Bereich ist die Ähnlichkeit der kernphysikalischen Beschleuniger- und Detektortechnologie mit den Experimentiermethoden am Infrarot-, Röntgen- und Elektronenstrahl so groß, dass die wissenschaftlichen Mitarbeiter des Instituts mit der ihnen zur Verfügung stehenden Infrastruktur wichtige Beiträge in diesem Bereich und damit zum Projekt Strahlungsquelle ELBE leisten konnten und können.

Mit der Strahlungsquelle ELBE werden dem Institut für Kern- und Hadronenphysik eigenständige kern- und strahlungsphysikalische Experimente vor Ort ermöglicht sowie dem Forschungszentrum Rossendorf zukunfts-trächtige Forschungsmöglichkeiten in verschiedenen Bereichen der Physik, Chemie, Biologie und Medizin neu erschlossen. Dabei stand die Mitarbeit des Instituts bei Konzeptions- und Aufbauarbeiten für die Strahlungsquelle ELBE sowie die Vorbereitung eines Forschungsprogramms für die mit dem ELBE-Elektronenstrahl erzeugte Sekundärstrahlung (Infrarot-, Brems- und Röntgenstrahlung sowie Neutronen) im Vordergrund.

Fünf der acht im Folgenden beschriebenen FE-Vorhaben beziehen sich vorrangig auf zukünftig an ELBE durchzuführende Arbeiten. Die drei weiteren sind der kernphysikalischen Grundlagenforschung zuzuordnen; hier spielt das Detektorlabor des Instituts eine entscheidende Rolle, indem es die Voraussetzungen für technisch aufwendige Experimente schuf, die in enger Zusammenarbeit mit Hochschul-

gruppen an auswärtigen Beschleunigern durchgeführt wurden.

## Wichtigste Ergebnisse

Anfang 1998 wurde im Institut die Abteilung FEL gebildet, um den Aufbau der Anlagen zur Erzeugung kohärenter Strahlung im mittleren Infrarot an ELBE voranzutreiben und um an anderenorts existierenden Anlagen Vor-experimente in diesem Wellenlängenbereich durchzuführen. Als wichtigstes Ergebnis ist hervorzuheben, dass im Rahmen von Kollaborationsvereinbarungen mit DESY in Hamburg und mit ENEA in Rom-Frascati je ein Permanentmagnet-Undulator aus diesen Labors für mehrere Jahre an ELBE aufgestellt werden kann.

Die Arbeiten zur Erforschung nichtkonventioneller Photonenquellen konzentrierten sich auf den Aufbau einer intensiven, quasimonoe-nergetischen und durchstimmbaren Röntgenquelle an der Strahlungsquelle ELBE sowie auf die Vorbereitung der Nutzung dieser Röntgenstrahlung für zellbiologische Untersuchungen. Es wurde gezeigt, dass auf der Basis des Elektronenchannellings in Kristallen Röntgenstrahlung im Energiebereich von 10 bis 50 keV mit hinreichender Dosisleistung erzeugt und die für diesen Prozess notwendige kleine Emittanz des Elektronenstrahls an ELBE erreicht werden kann. In Experimenten an ROBL in Grenoble und MAMI in Mainz wurde die theoretisch vorhergesagte stimulierte Diffraction von Röntgenstrahlung bzw. eine Intensitätserhöhung der erzeugten Channelingstrahlung durch Verwendung von ultraschallangeregten piezoelektrischen Quarzkristallen nachgewiesen.

Die im FZR entwickelte PET-Kontrolle von Tumorbehandlungen mit Kohlenstoffstrahlen an der GSI Darmstadt wurde im Jahre 1998 in den klinisch-experimentellen Routinebetrieb überführt. Bis Juli 1999 wurden insgesamt 974 Behandlungsfractionen bei 42 Patienten mit PET überwacht. Es zeigte sich, dass es die technische Auslegung des Tomographen und seine feste Einbindung in die Therapie-steuerung erlaubt, ein Behandlungsregime zu

verwirklichen, nachdem die typische Zeit von ca. 10 Minuten für die Bestrahlung eines Feldes durch die simultane PET-Messung um lediglich etwa 1 Minute verlängert wird. Die aus den PET-Daten gewonnenen Informationen zur in-situ Maximalreichweite der  $^{12}\text{C}$  Ionen führte zu einer Modifikation der Datenbasis für die Bestrahlungsplanung mit dem Ergebnis einer deutlichen Erhöhung der Präzision der Dosisapplikation.

Die Abteilung Kernphysik hat sich im Berichtszeitraum vornehmlich mit der Untersuchung von Fragen zur Struktur mittelschwerer Kerne befasst und dabei sowohl im Rahmen des EUROBALL-Projekts an Ionenbeschleunigern gearbeitet als auch – in Vorbereitung der an ELBE geplanten Experimente – Bremsstrahlung an Elektronenbeschleunigern genutzt. Die am FZR vorhandenen guten Möglichkeiten zu Entwicklung und Bau insbesondere von Detektoren hat diesen Untersuchungen und damit auch den beteiligten Gruppen von verschiedenen deutschen Universitäten entscheidend genützt. Der Siliziumball RoSiB, ein kompakter  $4\pi$ -Detektor für geladene Teilchen, der aus 40 speziellen Siliziumdioden besteht, wurde im Rossendorfer Detektorlabor entwickelt und aufgebaut. Zur Identifikation von Ejektilen verschiedener Kernladung kommt eine neuartige Impulsformanalyse zum Einsatz. In einem zusammen mit Universitätsgruppen aus Köln, Bonn und Göttingen unter Rossendorfer Federführung durchgeführten Experiment am EUROBALL-Detektorsystem in Legnaro ist für das Nuklid  $^{73}\text{Br}$  die bisher höchste Winkelgeschwindigkeit von  $\hbar\omega = 1.8$  MeV eines rotierenden Kerns beobachtet worden. Bei dieser schnellen Rotation erreichen die Nukleonen an der Kernoberfläche nahezu 25% der Lichtgeschwindigkeit und fast 30 MeV kinetische Energie; sie bleiben aber im mittleren Feld des kollektiv rotierenden Kerns gebunden. Das Phänomen der Magnetischen Rotation, das entscheidend durch das in Rossendorf entwickelte Tilted-Axis-Cranking(TAC)-Modell und die damit möglichen Interpretationen geprägt wurde, ist von dem American Institute of Physics zu einer der „top physics stories“ des Jahres 1998 erklärt worden (s. APS News und Physics Today). Die damit verbundenen theoretischen Entwicklungen sind für die Analyse der EUROBALL-Experimente, die gemeinsam mit den o.g. Hochschulgruppen durchgeführt wurden, von wesentlichem Wert. Die zum Tragen gekomme-

ne effektive Zusammenarbeit von Theorie und Experiment soll die Rossendorfer Kernphysik auch zukünftig auszeichnen. So ermöglicht eine neue Integrationsmethode erstmals, die durch Quantenfluktuationen kleiner Amplitude entstehende Korrelationsenergie in Kern- und Clustersystemen für die in der Praxis auftretenden großen Konfigurationsräume numerisch zu berechnen.

Zur Thematik des anomalen in-medium-Verhaltens von Hadronen mit Strangeness wurden durch die Analyse der Kaonen- und Antikaonenerzeugung in Experimenten am Schwerionensynchrotron SIS (KaoS und FOPI) weitere Hinweise auf eine effektive Antikaonen-Massenabsenkung durch Mediumeffekte gefunden. Experimentelle Grundlage für diese Feststellung ist die Beobachtung der Gleichheit von Kaonen- und Antikaonenerzeugungswahrscheinlichkeiten in symmetrischen Kern-Kern-Stößen bei äquivalenten Energien und die räumliche Verteilung der Kaonen relativ zu den Nukleonen. Auch diese Studien zur Mediumabhängigkeit der K-Massen werden dem American Institute of Physics gemäß zu den „top physics stories 1998“ zugerechnet.

### Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Eine sehr enge Zusammenarbeit besteht mit der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik, die für den Aufbau des ELBE-Beschleunigers zuständig ist und die eine FEL-Anordnung für den sehr langwelligen Infrarotbereich entwickelt. In gemeinsamen Diskussionen und auch Arbeitsgruppen wurden die für den FEL-Betrieb optimalen ELBE-Parameter erörtert, insbesondere betreffend Elektronenstrahl-Erzeugung, -diagnose und -transport. Außerdem gibt es einen regen Austausch über Aspekte der FEL-Strahlung, wobei die theoretischen Arbeiten in der Abteilung FEL von besonderer Bedeutung sind. Gemeinsam mit der Zentralabteilung Neue Beschleuniger wurden mit dem Strahlenschutz zusammenhängende Probleme bearbeitet sowie ein Konzept für eine lasergetriebene Elektronenkanone, die eine besonders geringe Emittanz haben soll, erstellt. Die Zusammenarbeit mit den anderen Instituten des FZR hat seit Beginn 1999 stark zugenommen, da dort zunehmend Interesse an der Nutzung von ELBE-Strahlung entsteht und entsprechende gemeinsame Konzeptstudien anlaufen.

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

Eine thematische Verbindung des Institutes mit dem Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie gibt es bei den Arbeiten zur Positronen-Emissions-Tomographie und dabei speziell bei den Bereichen um die biokinetische Modellierung der metabolisch bedingten Auswaschvorgänge der bei der Schwerionentherapie im bestrahlten Gewebe erzeugten Positronenemitter. Hierzu wurden im PET-Zentrum des FZR Experimente am Tiermodell der Ratte ausgeführt, die klar zeigten, dass die Modellierung dieser Auswaschvorgänge für eine korrekte Berechnung der zu einem gegebenen Bestrahlungsplan zu erwartenden  $\beta^+$ -Aktivitätsverteilung unabdingbar ist.

### **Zusammenarbeit mit externen Partnern**

Die besondere Bedeutung der Kollaborationen mit DESY und ENEA wurde schon erwähnt. Hervorzuheben ist, dass über die Überlassung von Undulatoren hinaus eine Zusammenarbeit bezüglich FEL-Fragen etabliert wurde; die IR-FEL-Arbeitsgruppe von ENEA will langfristig an ELBE experimentieren und im Rahmen eines EU-Projekts auch Wissenschaftler aus anderen Ländern einbringen, wobei die Arbeiten im mm-Bereich in Frascati und die bei kleineren Wellenlängen im FZR durchgeführt werden sollen. Aus Deutschland haben insbesondere das Institut für Biophysik der Universität Frankfurt, die Sektion Experimentelle Chirurgie der Universitätsaugenklinik Tübingen und das Institut für Analytische Chemie der TU Dresden ein besonderes Interesse an einer Arbeit am ELBE-FEL bekundet, und es wurde

mit der Erarbeitung von Konzeptstudien begonnen.

Im Rahmen des Aufbaus einer Quelle monochromatischer Röntgenstrahlung am künftigen Elektronenbeschleuniger ELBE des FZR hat sich eine fruchtbare Zusammenarbeit mit Gruppen der TU Darmstadt und der Universität Mainz sowie dem Institut für Physik und dem Institut für Angewandte Probleme der Physik in Jerewan (Armenien) etabliert, die die Erforschung des Mechanismus der Strahlungserzeugung und der Eigenschaften nichtkonventioneller Photonenquellen zum Inhalt hat. Im Hinblick auf die Anwendung der erzeugten Röntgenstrahlung für Untersuchungen zum Verständnis von Strahlenschädigungen biologischer Systeme auf subzellulärem Niveau wurde die traditionell enge Zusammenarbeit mit der Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radioonkologie des Universitätsklinikums vertieft. Bereits während der im Frühjahr 1999 begonnenen Konzeption eines zellbiologischen Bestrahlungsplatzes an ELBE wurde die Zusammenarbeit mit dem Ziel der Entwicklung einer auch vom biologischen Standpunkt aus optimalen Bestrahlungsanlage weiter intensiviert. Ferner wird zur Ausarbeitung einer in-situ Dosimetrie in Zellproben mit dem Institut für Strahlenschutzphysik der TU Dresden, der Wismut AG und der GSF in München-Neuherberg zusammengearbeitet.

Durch Etablieren von PET zur Kontrolle der Schwerionentherapie ist die Zusammenarbeit mit allen an der experimentellen Schwerionentherapie beteiligten Institutionen, d. h. mit der Radiologischen Universitätsklinik Heidelberg, der GSI Darmstadt und dem DKFZ Heidelberg sehr eng. Mitarbeiter des Institutes sind an jeder Patientenbehandlung beteiligt. Ferner sei auf den bereits begonnenen Transfer der Rossendorfer Kenntnisse zur Implementierung von PET bei Vielfelderbestrahlungen mit einer isozentrischen Strahlführung an der geplanten Ionenstrahlklinik in Heidelberg verwiesen. Eine weitere Zusammenarbeit zur Krebstherapie besteht mit der Nuklearmedizinischen Klinik der TU Dresden mit dem Ziel der Verstärkung der Wirksamkeit von Behandlungen mit Radioisotopen durch das Auslösen von Auger-Kaskaden in tumoraffinen Pharmazeutika mit Schwerelementanteilen.

Das Institut war entscheidend an der erfolgreichen Realisierung des EUROBALL-Detek-

---

torsystems, das 1997/98 seine erste Experimentierphase im INFN-LNL Legnaro absolvierte, beteiligt. Neben der Montage von Ge-Kapseln zu gut manipulierbaren CLUSTERN hat die Entwicklung und Anpassung spezifischer VXI-Elektronik-Module für die EUROBALL-Datennahme durch die Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik des FZR maßgeblich dazu beigetragen, die Zielparameter des EUROBALL-Spektrometers zu erreichen. Hiervon profitierte insbesondere die Serie von Experimenten, die zusammen mit den Partnergruppen der Kernphysik an den Universitäten in Köln, Göttingen, Bonn und Darmstadt an verschiedenen Beschleunigern durchgeführt wurden, sowie der Einsatz des eigenen Rossendorfer CLUSTERS bei der GSI Darmstadt und bei CERN, wo zusammen mit der Universität Mainz, der LMU München und mit außerdeutschen Partnern experimentiert wurde.

Mit dem Abschluss der Auswertung der bisherigen FOBOS-Experimente sind die eigenen Aktivitäten der Rossendorfer Kernphysik im VIK Dubna beendet worden. Das große  $4\pi$ -Detektorsystem FOBOS zur vollständigen

Messung von Reaktionsprodukten, das im FZR entwickelt und unter Federführung von Rossendorf im VIK Dubna am U400M aufgebaut worden war, ist dem VIK zur weiteren Nutzung durch eigene Gruppen übergeben worden. Die Arbeiten auf dem Gebiet der Hadronenphysik profitieren von der intensiven Zusammenarbeit dieser Abteilung mit entsprechenden Gruppen, vor allem von der TU Dresden, der TU und LMU München, der Universität Frankfurt, der Universität Gießen und der TU Darmstadt. Bei Experimenten an der GSI arbeiten noch die Physikalischen Institute der Universitäten Heidelberg und Marburg mit, bei den Arbeiten am COSY des FZ Jülich sind Gruppen der Universitäten Bochum, Erlangen, Köln, Bonn und Münster beteiligt; außerdem bestehen gute Kontakte zum KFKI Budapest, ITP Kiev, JINR Dubna und zu der Universität Nantes. Die gute personelle und apparative Ausstattung des Detektorlabors hat für insgesamt fünf große Experimente bei GSI bzw. FZJ wesentliche apparative Beiträge ermöglicht, für die bei den beteiligten Hochschulen keine entsprechenden Installationen zur Verfügung standen.

### Forschungsvorhaben

- Strahlungsquelle ELBE
- Forschung mit kohärenter Infrarotstrahlung
- Nichtkonventionelle Photonenquellen
- Biomedizinische Untersuchungen mit physikalischen Methoden
- Kernphysik mit Bremsstrahlung
- Kernstrukturuntersuchungen im Rahmen des EUROBALL-Projekts
- Elektromagnetische Signale von Hadronensystemen und das HADES-Projekt
- Strangeness in Hadronenreaktionen

## Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		49/44				Wissenschaftler			21/19		
Annexpersonal [Anzahl   Personenjahre]											
Postdoc	6/6	4,5/1,9	Doktoranden	2/2	0,8/0,6	Gastwissenschaftler	17/13	1,2/0,5	Hilfskräfte	2/1	0,2/0,1
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl   Personenjahre]											
Wissenschaftler	10/7	6,8/3,3	Technisches Personal	-/-	-/-	Gastwissenschaftler	20/7	1,7/1	Doktoranden	9/7	7,2/3,2
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		1080,9/101,3				drittmittelfinanziert			166,5/16,9		
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		20/17				Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			79/61		
Artikel (referiert)		43/34				Diplomarbeiten			-/1		
Artikel (nicht referiert)		4/2				Doktorarbeiten			2/3		
Artikel im Eigenverlag		6/6				Patentanmeldungen			1/-		
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		2/2									

Direktor

Prof. Dr. E. Grosse Tel.: (0351) 260-2270

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

Abteilungsleiter

Abteilung

Tel.

e-Mail

Prof. Dr. E. Grosse Freie Elektronen Laser 2270

E.Grosse@fz-rossendorf.de

Prof. Dr. B. Kämpfer Hadronenphysik 3258

B.Kämpfer@fz-rossendorf.de

Dr. F. Dönau Kernphysik 3372

F.Doenu@fz-rossendorf.de

Dr. H. Prade Strahlungsphysik 3270

H.Prade@fz-rossendorf.de



## Überblick und Zielstellung

Die Forschung des Institutes ist auf die Bewertung und Erhöhung der Sicherheit, Effizienz und Umweltverträglichkeit technischer Anlagen gerichtet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung und Validierung mathematisch-physikalischer Modelle zur Prozess- und Störfallanalyse und von Verfahren zur Anlagen- und Prozessüberwachung. Die konkreten Anwendungen betreffen gleichermaßen kern- und verfahrenstechnische Einrichtungen.

Zur Analyse der Thermofluidodynamik bei normalen Prozessverläufen und Störfällen werden physikalische Modelle und Computercodes für Mehrphasen- und Mehrkomponentenströmungen sowie die orts- und zeitabhängige Leistungsfreisetzung (Neutronenkinetik, chemische Reaktionskinetik) entwickelt.

Die theoretischen Arbeiten bauen auf experimentellen Untersuchungen zur chemischen Verfahrenstechnik und zu Zweiphasenströmungen auf. Insbesondere beabsichtigt das Institut, in den nächsten Jahren eine Mehrzweckversuchsanlage (TOPFLOW) zur Analyse transienter Strömungsphänomene zu errichten. Durch die Entwicklung von Zweiphasenmesstechnik ist der Zugang zu solchen Strömungsparametern zu verbessern, die die Austauschterme zwischen den Phasen und Komponenten beschreiben.

Die Magnetohydrodynamik (MHD) ist eine spezielle Ausprägung der Thermohydraulikforschung des Institutes und befasst sich mit der gezielten Beeinflussung elektrisch leitfähiger Fluide durch externe elektromagnetische Felder. Sie eröffnet technologische und sicherheitsrelevante Anwendungen in der Halbleitertechnik, der Metallurgie und beispielsweise der Elektrochemie. Die Arbeiten sind maßgeblicher Bestandteil eines Innovationskollegs gemeinsam mit der TU Dresden.

Die Arbeiten zur Materialsicherheit widmen sich dem Verhalten von Werkstoffen unter Neutronen- und Gammabestrahlung. Mit Hilfe bruchmechanischer Untersuchungen an bestrahlten und thermisch ausgeheilten Proben werden die Versprödungssuszeptibilität und der Zustand nach der Ausheilung in

Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung bestimmt. Das Institut hat sich auf die Anwendung moderner Materialprüfmethoden auf bestrahltes, radioaktives Material spezialisiert. Hierfür stehen neue Präparations- und Prüflabors zur Verfügung. Die mikrostrukturellen Mechanismen der Bestrahlungsverödung werden durch hochauflösende Strukturanalysemethoden aufgeklärt. Um die für solche Versprödungsuntersuchungen benötigten Angaben zu den Strahlungsfluenzen zuverlässig zu bestimmen, werden genaue Methoden der Strahlungsfeldberechnung entwickelt und am Experiment validiert.

Ausgehend von den Störfalllasten (Drücke, Temperaturen) und den mechanischen Eigenschaften der sicherheitsrelevanten Komponenten wird die Integrität von Anlagen über strukturdynamische Berechnungen bewertet. Dabei müssen die thermischen und mechanischen Wechselwirkungen zwischen den Fluiden und den Komponenten berücksichtigt werden.

Beim Transport von Schadstoffen in der Ökosphäre konzentriert sich das Institut auf die Modellierung der physikalischen und chemischen Vorgänge im Zusammenhang mit der Migration von Radionukliden in mit Wasser unvollständig gesättigten Bodenzonen. Die theoretischen Modelle werden an Laborexperimenten validiert. Die Relevanz der Thematik ergibt sich aus den Altlasten des Uranbergbaus in Ostdeutschland.

Die entscheidungsanalytischen Arbeiten zur Unterstützung von Strategien für die Remediation von Umwelt-Altlasten sind eingestellt worden. Diese Thematik konnte nicht ausreichend in das Umfeld des Institutes eingebunden werden.

Das Institut bildet zusammen mit der TU Dresden und der HTWS Zittau/Görlitz eines der verbliebenen 4 Kompetenzzentren für die nukleare Energie- und Sicherheitsforschung in Deutschland. Es ist das einzige in Ostdeutschland und hat regional für die Erhaltung der wissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Kompetenz Sorge zu tragen. Die wissenschaftlichen Verbindungen mit den anderen Kompetenzzentren, insbesondere mit der GRS und der TU München, sind sehr intensiv.

## Wichtigste Ergebnisse

Das Institut war im Berichtszeitraum äußerst erfolgreich bei der Drittmittelinwerbung. 44 % des gesamten Institutsbudgets stammen aus der Forschungsförderung und aus Forschungsaufträgen. Dabei sind 27 % Fördermittel des Bundes, des Freistaates Sachsen und der EU. 10 % der Mittel kommen von der DFG und 7 % aus Forschungsaufträgen.

Das gemeinsame Innovationskolleg mit der TU Dresden zur Magnetohydrodynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten ist um zwei Jahre verlängert worden. Die Mittel wurden von der DFG um 40 % aufgestockt. Zusammen mit der TU Dresden und anderen Partnern ist inzwischen ein Antrag auf Fortführung der Arbeiten als SFB gestellt worden, nachdem die DFG dies ausdrücklich empfohlen hatte.

Das Institut hat Meetings und Workshops mit internationaler Beteiligung veranstaltet. Darunter sind der Workshop zur Messtechnik für Zweiphasenströmungen und das Meeting zum MHD-Dynamoefekt, das in Lettland stattfand, besonders zu nennen.

Für die Analyse der Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren bei unterstellten Kaltwasser- und Deborierungstransienten ist der Versuchsstand ROCOM für einen deutschen Druckwasserreaktor im Maßstab 1:5 aufgebaut und in Betrieb genommen worden. Die bisherigen Experimente und die begleitenden CFD-Rechnungen zeigen die Existenz großräumiger Wirbel im Downcomer, die die Vermischung wesentlich beeinflussen. Bei stationärem Geschwindigkeitsfeld und hohen Kühlmitteldurchsätzen, wie sie für Szenarien mit Frischdampfleck typisch sind, ist der Vermischungsgrad relativ schlecht. Die Konzentrations- und Temperaturprofile zeigen in diesem Fall eine starke Sektorbildung entsprechend der Einbindung der Kaltstränge.

Die grundlegenden Experimente zur Gasgehaltsverteilung in einer aufwärts gerichteten Zweiphasenströmung haben Dank der im Institut entwickelten Messtechnik (Gittersensor) neue Erkenntnisse zur Struktur der Zweiphasenströmung geliefert. Die hohe Auflösung der Sensoren erlaubt die Messung der Blasengrößenverteilung, auf deren Basis neue, physikalisch begründete Kriterien für den Umschlag der Strömungsform abgeleitet und Modelle für Blasenkoaleszenz und -fragmentation

entwickelt werden können. Der Vergleich der gemessenen Gasgehaltsprofile mit CFD-Rechnungen erlaubt eine Überprüfung der Ansätze für die auf die Gasblasen einwirkenden Kräfte. Durch Nachrechnungen mit CFX-4.2 konnten bestehende Modelldefizite aufgezeigt werden.

Mit dem Program BRICK ist ein 1D-Simulationstool für Mehrphasenströmungen bei der Druckentlastung von Chemiereaktoren entstanden. Es beinhaltet Teilmodelle für Phasenübergänge unter Nichtgleichgewichtsbedingungen, die Simulation der chemischen Reaktionskinetik und die Entwicklung der Blasengrößenverteilung. Übergänge zwischen Blasenströmung, Schaum und Gasphase können frei von numerischer Diffusion beschrieben werden. Das Programm ist vor der DIERS User Group vorgestellt worden. Daraufhin ist das Institut vom American Institute of Chemical Engineers ausdrücklich zur Mitarbeit bei DIERS aufgefordert worden.

Mit Hilfe der Kontrastvariation bei Kleinwinkelstreuanalysen konnte ein wesentlicher Schritt zur Aufklärung der strahlungsinduzierten Mikrostrukturschäden in russischen Druckbehälterstählen getan werden. Die bestrahlten Proben weisen Cluster aus Leerstellen, Eisen und Fremdatomen auf. Der Gesamtvolumenanteil nimmt mit zunehmender Fluenz zu, nicht jedoch die Größe der einzelnen Cluster. Durch thermische Behandlung können die Strukturschäden ausgeheilt werden.

Die methodischen Erweiterungen des Rossendorfer Monte-Carlo-Programmes TRAMO haben zu einer verbesserten Darstellung der Winkelverteilung bei elastischer Streuung geführt, wodurch eine erhebliche Verkürzung der Rechenzeiten möglich wird. Insbesondere hängt die Rechenzeit kaum noch von der Zahl der Energiegruppen ab, so dass der Energiediskretisierungsfehler vernachlässigbar klein gehalten werden kann. Dies ist ein entscheidender Durchbruch für den breiten Einsatz von Monte-Carlo-Verfahren in der Reaktordosimetrie.

Durch numerische Simulationen zur Magnetfeldkontrolle der Schmelzekonvektion bei der Züchtung von Si-Einkristallen nach dem Czochralski-Verfahren konnte nachgewiesen werden, dass man mit optimierten Magnetfeldsystemen in der Lage ist, die Strömung derart zu beeinflussen, dass eine Verbesserung des

Züchtungsprozesses und der Qualität der Einkristalle erreicht werden kann. Die Magnetfeldkontrolle ist inzwischen eines der Verfahren, das von der Wacker Siltronic AG für die Herstellung von 300-mm-Si-Wafern favorisiert wird.

### **Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit**

Das Institut arbeitet eng mit anderen Instituten des Forschungszentrums zusammen.

Dies gilt in besonderer Weise für die Modellierung des Radionuklidtransportes gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie. Die beiden Institute vereinen ihre Kompetenz zur Speziationsanalytik einerseits und zur mathematischen Modellierung physiko-chemischer Prozesse andererseits.

Gemeinsam mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik und mit der TU Dresden arbeitet das Institut am Projekt zur Erzeugung schneller Neutronen an ELBE. Bislang sind Abschirmungs- und Aktivierungsrechnungen sowie Rechnungen zur energieabhängigen Deformation des Neutronenimpulses durchgeführt worden.

Darüber hinaus nutzt das Institut konsequent die wissenschaftliche Infrastruktur und die Verfahren anderer Institute für neue Ansätze in der Sicherheitsforschung. Als Beispiele sind die Anwendungen von PET-Methoden in der Strömungsmesstechnik (Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie), die Entwicklung schneller und räumlich hochauflösender tomografischer Messtechnik für Zweiphasenströmungen (Institut für Kern- und Hadronenphysik, Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik) und die Strukturanalyse von geschädigten Werkstoffen (Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung) zu nennen.

### **Zusammenarbeit mit externen Partnern**

Die wissenschaftliche Kooperation mit der chemischen und pharmazeutischen Industrie ist weiter ausgebaut worden. Neben einem gemeinsamen BMBF-Projekt zur Früherkennung unerwünschter Prozesszustände in Rührkesselreaktoren arbeitet das Institut mit dem Arzneimittelwerk Dresden (AWD) im Rahmen eines bilateralen Vertrages zur Kinetik von Grignard-Reaktionen zusammen. Ein weiterer

wichtiger Industriepartner ist die Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber, in deren Auftrag ein diversitärer Füllstandsmelder für Siedewasserreaktoren entwickelt wurde und die die Untersuchungen zur Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren kofinanziert. Wichtige Industriepartner auf dem Gebiet der MHD leitfähiger Fluide sind u. a. die Wacker Siltronic AG, die Hamburgische Schiffbauversuchsanstalt und die Klöckner/Moeller GmbH.

Intensive Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen in Deutschland gibt es vor allem mit dem FZ Jülich zur Thermohydraulik passiver Sicherheitssysteme, mit dem FZ Karlsruhe zur Weiterentwicklung von CFD-Codes und zur Zweiphasenmesstechnik sowie beispielsweise mit der GRS zur Reaktordynamik und Thermohydraulik. Gemeinsam mit der TU Dresden, der TU-BA Freiberg und dem IFW Dresden ist die erste Antragsfassung für einen SFB zur MHD leitfähiger Flüssigkeiten erarbeitet worden.

Die Kollaboration mit osteuropäischen Einrichtungen, insbesondere zur Physik und Sicherheit von WWER-Reaktoren, hat eine lange und stabile Tradition. Aus diesem Grunde war das Institut im Berichtszeitraum an 4 PHARE/TACIS-Projekten der EU z. T. federführend beteiligt. Partner auf östlicher Seite waren u. a. das Kurchatov-Institut Moskau, das NRI Rez und das INRNE der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften.

Darüber hinaus gibt es inzwischen nachhaltige Kooperationen mit Forschungspartnern in der EU und in den USA. Beispielsweise war das Institut an einer konzertierten Aktion der EU zur Stabilität von SWR beteiligt, an der auch das CEA Cardarache, das PSI Würenlingen und IRI Delft teilgenommen haben. Gegenwärtig arbeiten wir in einer europaweit konzertierten Aktion zur Kühlmittelvermischung in DWR mit, die vom VTT Finnland koordiniert wird. Auf dem Gebiet der MHD ist insbesondere die Zusammenarbeit mit dem LEGI Grenoble zu nennen. Vielfältige Verbindungen gibt es zur Pennsylvania State University, die u. a. die Reaktordynamik und Materialicherheit betreffen.

## Forschungsvorhaben

- Störfallanalyse
- Thermofluiddynamik
- Material- und Komponentensicherheit
- Sicherheit und Effektivität chemischer Prozesse
- Teilchen- und Strahlungstransport
- Magnetohydrodynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten

## Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

Mitarbeiter [Planstellen]												
Gesamt			52/50			Wissenschaftler			17/16			
Annexpersonal [Anzahl   Personenjahre]												
Postdoc	5/4	2,5/1,5	Doktoranden	6/2	3/1	Gastwissenschaftler	20/-	1/-	Hilfskräfte	6/5	2/1,3	
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl   Personenjahre]												
Wissenschaftler	38/33	25,6/14,5	Technisches Personal	13/14	7,1/4,6	Stipendiaten	3/3	0,7/1,1	Doktoranden	8/7	7/3,6	
Gastwissenschaftler	43/24	3,6/1	Student. Hilfskräfte	5/2	1,8/0,5	Postdoktoranden	1/1	1/0,5				
Geräteinvestitionen [TDM]												
grundfinanziert			1.406,3/396,6			drittmittelfinanziert			224,1/82,4			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]												
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken			39/45			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			69/59			
Artikel (referiert)			28/34			Diplomarbeiten			-/-			
Artikel (nicht referiert)			1/-			Doktorarbeiten			1/1			
Artikel im Eigenverlag			18/7			Patentanmeldungen			5/9			
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]												
Meetings / Workshops			4/4									

Direktor:

Prof. Dr. F.-P. Weiß Tel.: (0351) 260-3480

e-Mail: F.P.Weiss@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter	Abteilung	Tel.	e-Mail
Dr. H.-M. Prasser	Experimentelle Thermofluiddynamik	3460	H.M.Prasser@fz-rossendorf.de
Dr. J. Böhmert	Material- u. Komponentensicherheit	3186	J.Boehmert@fz-rossendorf.de
Dr. K. Noack	Teilchen- und Strahlungstransport	3239	K.Noack@fz-rossendorf.de
Dr. G. Gerbeth	Magneto-Hydrodynamik	3484	G.Gerbeth@fz-rossendorf.de
Dr. U. Rohde	Störfallanalyse	3460	U.Rohde@fz-rossendorf.de

# ZENTRALABTEILUNG FORSCHUNGS- UND INFORMATIONSTECHNIK

## Überblick über die Zielstellung

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

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

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

Schwerpunkte bildeten im Jahre 1997 die Arbeiten zur Rossendorfer Beamline ROBL, die an der ESRF in Grenoble errichtet wird, Arbeiten für das Materialprüflabor, Entwicklungsarbeiten für den Tandembeschleuniger und die Arbeiten am ELBE-Projekt. An diesen Projekten sind jeweils mehrere Institute bzw. Zentralabteilungen des Forschungszentrums beteiligt.

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

## Wichtigste Ergebnisse

### Strahlungsquelle ELBE

Die Ergebnisse und Beiträge zum Großprojekt „Strahlungsquelle ELBE“, das durch den Leiter der Zentralabteilung als Projektleiter geführt wird, sind auf Seite 102ff. zusammengefasst.

### Beamline ROBL

Schwerpunkt war der Messplatz für die Radiochemie. Die Glovebox einschließlich Messaufbauten und Zubehörteile zum Untersuchen radioaktiver Proben mit Synchrotronstrahlen wurden fertiggestellt und im FZR in Betrieb genommen und erprobt. Anschließend erfolgte der Aufbau und die Inbetriebnahme in der ESRF und der Test unter Betriebsbedingungen. Am Jahresende wurden in und mit der Einrichtung erstmalig aktive Proben gemessen. Für die technische Dokumentation ROBL wurden entsprechende Zuarbeiten erstellt.

Die Hand- und Fernsteuerung der Präzisionsantriebe (16 Achsen) und der Hauptantriebe (3 Achsen) für die Glovebox im radiochemischen Labor wurde zur Einweihung der Beamline am 8.6.1998 übergeben.

Es erfolgte der weitere Aufbau und die Inbetriebnahme der Steuerung der Beamline und der Messplätze.

### Radionuklidlabor für Werkstoffuntersuchungen

Die Erprobung der Einrichtungen der 1. Ausbaustufe wurde betreut. Bei Bedarf erfolgten Änderungen an den Baugruppen der Prüfeinrichtungen. Für die 2. Ausbaustufe wurde im Wesentlichen die Aufgabenstellung für die Auftragsvergabe der Heißen Zelle erstellt. Mit dem Auftragnehmer erfolgte die Präzisierung der Aufgabe und die Betreuung der Entwicklungsarbeiten.

Versuche an der gelieferten Drahterodiermaschine für die Probenherstellung wurden betreut und an einem neuen Filtersystem gearbeitet sowie diverse Modifikationen der Maschine vorbereitet. Nach Anlieferung der Box für das Pendelschlagwerk erfolgten erste Komplettierungsarbeiten. Die Probenpositionier- und Temperiereinrichtung für das Pendelschlagwerk sowie die Steuerpulte in der 1. Ausbaustufe wurden bis zur Einweihung des Radionuklidlabors am 21.6.1998 übergeben und anschließend einer gründlichen Betriebserprobung unterzogen. Die erforderlichen Ergänzungen wurden im Berichtszeitraum vorgenommen.

### Ausbau Ionenstrahltechnik

Die mechanischen Vakuorkammern, die Rohrleitungen und der Support für die Strahlkop-

plung wurden fertiggestellt. Ein großer Teil des neuen Strahlführungssystems für die Strahlkopplung von Tandetron-Beschleuniger und 500-kV-Implanter wurde in Betrieb genommen. Dazu gehört der elektrische Anschluss der Strahlführungs- und Vakuumkomponenten, der Aufbau einer speziellen Magnetstromversorgung, die Programmierung der SIMATIC-Steuerungstechnik und die Fortführung der Projektierung des Bedien- und Beobachtungssystems WinCC. Durch eine bessere Bedienoberfläche konnte die Ergonomie für den Anlagenbediener erheblich verbessert werden. Die Bedienrechner am Tandetron und am Inplanter wurden konfiguriert und mit dem Profibus an die Steuerung und dem Ethernet an das Institutsnetz angeschlossen. Zur Strahlbeobachtung wurde eine spezielle Gerätetechnik in Betrieb genommen.

Die Arbeiten an der Strahlführung (Injektor Tandem) wurden abgeschlossen. Die Simaticsteuerung des Injektors wird in das gesamte Steuerungssystem der Strahlkopplung eingebunden. Der erste Teil der Strahlkopplung (Anbau Tandem) wurde aufgebaut und erprobt. Nach Fertigstellung des mechanischen Aufbaus erfolgt die Gesamterprobung der Kopplung Tandetron-Implanter. Das Vakuumssystem wurde konstruiert und gefertigt.

#### **Dresdner Hochfeldlabor**

Für den Vorschlag zur Beantragung des Dresdner Hochfeldlabors in Rossendorf wurde das Kapitel über die Stromversorgung überarbeitet. Der Schwerpunkt der Arbeit im Berichtszeitraum lag in der Entwicklung, Konstruktion und Fertigung der 1,25-MJoule-Kondensatorbank für das Hochfeldlabor der Dresdner Hochfeldgruppe im IFW Dresden. Die Arbeit an diesem Thema wurde bis zur Fertigung des ersten 250-kJoule-Moduls vorgebracht.

#### **EUROBALL**

Es erfolgte die laufende Betreuung der EUROBALL-Messungen in Legnaro. Vor dem Umsetzen des EUROBALL-Detektors nach Strasbourg wurde an allen von Rossendorf gelieferten VXI-Modulen für die BGO-Clusterdetektoren eine Modifikation zur Erhöhung der Effektivität bei niedrigen Energien vorgenommen. Beim Aufbau des Detektors in Strasbourg wurden alle Module vor Ort getestet.

#### **Miniatur-Vielkanalanalysator MCA166**

Für den MCA 166 (Miniatur Multichannel Analyser) wurde die bereits entwickelte Software weiter gepflegt sowie spezielle Anwendungssoftware im Rahmen eines Vertrages für EURATOM entwickelt. Den Anwendern des Gerätes wurde Hilfestellung bei der Einbindung neuer Detektorsysteme und bei der Implementierung neuer Messaufgaben gewährt (z.B. CdZnTe-Miniatur-Detektor zur Urananalyse, Möglichkeiten zur nachträglichen Totzeitkorrektur bei Realtime-basierten Messungen für die IAEA).

#### **Spezielle Entwicklungen**

Für die Ionenmikrostrahlanlage IMSA-100 wurde ein neuer Scanprozessor, der eine höhere Abtastrate aufweist, entwickelt, aufgebaut, getestet und an die Nutzer übergeben.

Von der Werkstatt wurden folgende Baugruppen erstellt und montiert :

#### **Beamline ROBL**

- Endmontage der Glovebox mit optischer Bank und Hubeinrichtung sowie deren Einrichtungen (wie z. B. Probenwechsler und -halter, Blendensystem, Positioniersysteme)
- Demontage, Oberflächenbehandlung, Montage in Grenoble
- Einzelbaugruppen für Versuchsaufbauten

#### **Institut für Sicherheitsforschung**

- Herstellung von verschiedenen Ausführungen des Gittersensors für Strömungsmessungen
- Herstellung von Sonden
- Unterstützung bei verschiedenen Arbeiten für das Werkstoffprüflabor, z. B. Erodiermaschine für radioaktive Proben
- Aufbau des Kerbschlagproben-Versuchsstandes

#### **Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung**

- Herstellung von Komponenten für die Strahlkopplung (7 Diagnosekammern, Rohrstücke, Anfertigung und Änderung verschiedener Gestelle - insgesamt 44 Stück)
- Anfertigung von 40 Spaltsystemen
- Anfertigung von 5 Quellenmodulen
- Anfertigung von einem Bremsliniensystem BLS
- Anfertigung von Einbauten für die Implantationskammer

### Institut für Kern- und Hadronenphysik

- Herstellung von 16 Laserdurchführungen

### Hochfeldlabor

- Anfertigung von mechanischen Bauteilen für den Versuchsstand

### Ohne Zuordnung

- Bearbeitung von 140 Aufträgen kleineren bis mittleren Umfangs, die keinem der oberen Themen zugeordnet sind
- Verwaltung des Metall-Lagers für alle Verbraucher am Forschungsstandort Rossendorf und VKTA

### Zusammenarbeit mit externen Partnern

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

### Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

Mitarbeiter [Planstellen]									
Gesamt		52/50,5			Wissenschaftler			11/11	
Annexpersonal [Anzahl   Personenjahre]									
Doktoranden	1/1	1/0,6							
Geräteinvestitionen [TDM]									
grundfinanziert		321,7/136,8			drittmittelfinanziert			-/-	
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]									
Artikel (referiert)		1/6			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			1/1	

Abteilungsleiter

Dr. F. Gabriel

Tel. : (0351) 260-3109

e-Mail: F.Gabriel@fz-rossendorf.de

# ZENTRALABTEILUNG NEUE BESCHLEUNIGER

## Überblick und Zielstellung

Die Zentralabteilung Neue Beschleuniger hat als Teil der wissenschaftlichen Infrastruktur die Aufgabe, Projektierungs- und Entwicklungsarbeiten für das Projekt Strahlungsquelle ELBE durchzuführen und das Zyklotron U-120 für interne und externe Nutzer zu betreiben sowie seine Stilllegung zum Ende des Jahres 1999 vorzubereiten. Zukünftig wird die Zentralabteilung den Betrieb von ELBE übernehmen. Die Firma Linde weist bereits zwei Mitarbeiter der Zentralabteilung in die Betriebsführung der Helium-Kälteanlage von ELBE ein. Am Aufbau der Strahlungsquelle ELBE ist die Zentralabteilung auf folgenden Gebieten maßgeblich beteiligt:

- HF-Technik
- Strahlenschutz
- Supraleitende Photo-HF-Elektronenquelle.

## Wichtigste Ergebnisse

### 1. Strahlungsquelle ELBE

Die Ergebnisse und Beiträge zum Projekt „Strahlungsquelle ELBE“ sind auf Seite 102 ff. zusammengefasst.

### HF-Technik

Für das Hochfrequenzsystem der Strahlungsquelle ELBE wurden folgende Komponenten konstruiert, aufgebaut und erprobt:

- drei Klystronverstärkerschränke für je 10 kW HF-Leistung
- Treibermodule für Klystronverstärker
- Prototypen der Baugruppen zur Amplituden- und Phasenstabilisierung für 1300 MHz und 260 MHz
- Referenzsignalerzeugung und -verteilung (Ingenieurpraktikum)
- Tiefpassfilter mit Digitalem Signalprozessor (Ingenieurpraktikum)
- HF-System für 260-MHz-Buncher (Injektor)
- HF System für 1300-MHz-Buncher (Injektor)
- Entwicklung und Bau von zwei HF-Kopplern für die supraleitenden Kavitäten in Zusammenarbeit mit FWF und der Stanford Universität
- Konstruktion und Aufbau eines Kopplerteststands zur Erprobung und Konditionierung der supraleitenden HF-Koppler mit FWF und mit Unterstützung von DESY-MHF.

Für die supraleitende Photo-HF-Elektronenquelle wurde die Konstruktion des HF-Systems abgeschlossen. Aufgebaut und erprobt sind die Baugruppen für die Amplituden- und Phasenregelung sowie für den Klystrontreiber.

### Strahlenschutz

Auf der Grundlage des Sicherheitsberichtes zur Strahlungsquelle ELBE vom 15.5.1997 erteilte am 4.5.1998 das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie die Errichtungsgenehmigung für ELBE. Für die Erweiterung des ELBE-Projektes durch den Anbau einer Halle für Neutronenexperimente (Neutronenhalle) wurde gemeinsam mit der TU Dresden am 30.6.1998 der Sicherheitsbericht fertig gestellt. Die Genehmigung zur Errichtung der Neutronenhalle erfolgte am 13.11.1998.

### Supraleitende Photo-HF-Elektronenquelle

Die Arbeiten zur Entwicklung der supraleitenden Photo-HF-Elektronenquelle sind so konzipiert, dass bis Ende 1999 die Entwicklung und Erprobung der einzelnen Komponenten (Photokathodenpräparationskammer, HF-Resonator, Laser, Kryostat, HF-Koppler, HF-Versorgung) erfolgen und Anfang 2000 mit dem Zusammenbau und der Erprobung des Gesamtsystems begonnen werden kann. Bis Mitte 1999 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Aufbau und Erprobung der Photokathodenpräparationskammer  
Erzielte Ergebnisse:  
Quanteneffizienz 9 % mit Te<sub>2</sub>Cs-Schicht  
Langzeitstabilität 2 Wochen gemessen.
- Ausmessung des Quellenresonators im Testkryostaten von DESY  
Erzielte Ergebnisse:  
ohne Kathode:  
 $E_{\text{peak}} = 36,1 \text{ MV/m}$ ,  $Q = 8 \cdot 10^8$   
mit Kupferkathode:  
 $E_{\text{peak}} = 43,6 \text{ MV/m}$ ,  $Q = 1 \cdot 10^9$
- Test des LN<sub>2</sub>-Kühlkreislaufes für die Photokathode an der TU Dresden
- Transport eines Kryostaten und eines HF-Kopplers von Stanford nach Rossendorf und Beginn der Anpassungsarbeiten
- Beginn der Laserentwicklung am Max-Born-Institut Berlin.



## 2. Zyklotron U-120

Das Zyklotron lief ohne Störung. Im September 1998 fand ein Kolloquium anlässlich des 40-jährigen Betriebsjubiläums statt.

Zyklotron-Anwendungen waren im Berichtszeitraum:

- Herstellen von 211-Astat für die medizinische Forschung (TU Dresden, Universität Göteborg)
- (n,f)-Reaktionen für Modellexperimente mit dem Gas-Jet und Herstellung von Homologen zur Chemie der schwersten Elemente (Institut für Radiochemie, TU Dresden)
- Herstellen von 43-Scandium zur Untersuchung der Biodistribution mit Hilfe der PET-Messtechnik (Institut für interdisziplinäre Isotopenforschung Leipzig)
- Untersuchungen zur Diffusion und Absorption von Radon in Baustoffen (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen Zittau/Görlitz)
- Aktivierungen zur Untersuchung von Gitterfehlbesetzungen in ternären Halbleitermaterialien (TU BA Freiberg)
- Dosimetrische Eigenschaften von Thermoluminophoren (TU Dresden)
- Untersuchungen zur Wirkung kleinster Dosen in medizinisch-biologischen Proben (TU Dresden)

- Dünnschichtaktivierungen für Verschleißuntersuchungen (überregionale Auftraggeber)
- Strahlenresistenzuntersuchungen an mikroelektronischen Baugruppen

### Zusammenarbeit mit externen Partnern

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

Der Zyklotronstrahl wird neben Forschern aus dem FZR auch von regionalen und überregionalen Forschergruppen in Anspruch genommen. Traditionell sind die Herstellung radioaktiver Nuklide für biomedizinische und radiochemische Forschungsarbeiten universitärer Einrichtungen sowie Dünnschichtaktivierungen für Verschleißuntersuchungen industrienahe Forschungsinstitute.

## Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		10/11			Wissenschaftler			3/4			
Annexpersonal [Anzahl   Personenjahre]											
Postdoc			Doktoranden	1/-	0,2/-	Gastwissenschaftler	1/-	-/-	Hilfskräfte	2/5	0,5/1,1
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl   Personenjahre]											
Wissenschaftler	2/2	0,3/0,4	Gastwissenschaftler	2/-	0,4/-	Student. Hilfskräfte	-/3	-/0,9			
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		74,5/9,2			drittmittelfinanziert						
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		-/2			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			2/5			
Artikel im Eigenverlag		2/2			Doktorarbeiten			1/-			

Abteilungsleiter

Dr. H. Guratzsch

Tel.: (0351) 260-3283

e-mail: H.Guratzsch@fz-rossendorf.de

# ABTEILUNG KOMMUNIKATION UND DATENVERARBEITUNG

## Überblick über die Zielstellung

Die Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung versteht sich als Koordinierungs- und Kompetenzzentrum für die Prozesse der Datenverarbeitung und Datenkommunikation am Forschungsstandort Rossendorf.

Die Abteilung ist Teil der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur. Sie ist der Hauptabteilung Technische Infrastruktur des FZR zugeordnet.

## Wichtigste Ergebnisse

Die Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung nahm im Berichtszeitraum einen weiteren Parallelrechner V 2250 der Fa. HP mit 8 Prozessoren als Compute-Server in Betrieb. Mit der Installation von 3 IBM-Systemen (RS/6000 S70 und 2 x RS/6000 F50) wurde die Voraussetzung für die Modernisierung und den Ausbau des File-Services geschaffen. Der Server RS/6000 S70 steht auch für interaktive Dienste zur Verfügung. Die genannten neuen Server lösen die inzwischen moralisch verschlissenen CONVEX C3-Maschinen und das SPP1000 ab, die im Laufe des Jahres 1999 außer Betrieb genommen werden. Die Dienste wurden auf 14 Zentrale Server neu verteilt und die Software-Produkte auf den neuesten Stand gebracht.

An den Zentralen Servern stellte die Abteilung neben Rechenleistungen für skalares, paralleles und vektoriell-rechnen (installierte Gesamtkapazität z.Zt. 3.2 GFlops Linpack 100) infrastrukturelle Dienste bereit, die zentrumsweit genutzt werden. Hierzu zählen u. a. Back-up, Datenarchivierung auf der Basis von UniTree und eines Bandroboters sowie auf CD-ROM, die Bereitstellung von Datenbanksystemen, von Informationsdiensten (WWW, NetNews), E-mail-, Ftp, Bootservice für X-Terminals, ferner von Druck- und Scandiensten.

An den Zentralen Servern waren im Juni 1999 mehr als 800 Nutzer eingetragen, von denen 520 ständig aktiv waren. 11 Abteilungen des FZR verwendeten Speicherplatz der Zentralen Server über die bereitgestellten File-Dien-

ste als abteilungseigene Netzlaufwerke für ihre PC. Standortweit griffen insgesamt 550 PC auf Dienste der Zentralen Server (Nutzung Netzlaufwerke, Druckdienste u.a.) zu.

Die Graphikdienste haben hinsichtlich ihres wissenschaftlich-technischen Niveaus und ihres Nutzungsumfanges einen weiteren Aufschwung genommen: Die Technologie der Videoerstellung wurde weiterentwickelt und bei der Erzeugung von Videos zur Simulation von Prozessen eingesetzt. Neben der Bearbeitung und Herstellung von Druckvorlagen und Vortragsfolien hat sich auch der Druck von farbigen A0-Postern zu einem zentrumsweit genutzten Dienst entwickelt.

Neben dem systematischen Ausbau des lokalen Datennetzes auf gegenwärtig über 1400 aktive IP-Adressen mit standortweit mehr als 900 PC, 160 Workstations und 95 XTerminals galten die Arbeiten der Einführung innovativer Netztechnologien: in stark belasteten Netzabschnitten fand der Übergang zum switched Ethernet (10 MBit/s und 100 MBit/s) statt.

Zur Verbesserung der Transparenz bei der Netzverwaltung fanden VLAN-Strukturen Anwendung. Der Anschluss des FZR an das Wissenschaftsnetz (WIN) konnte im April 1998 von 128 KBit/s auf 2 MBit/s aufgerüstet werden. Der Standort nutzt nunmehr eine 2-MBit/s-Teilkapazität des Breitband-WIN (B-WIN) am Gemeinschaftsanschluss in der TU Dresden.

Die informationstechnische Infrastruktur am Forschungsstandort hat sich im Berichtszeitraum rasch weiterentwickelt. Die zunehmende Belastung der Nutzer durch die Administration der Rechentechnik am Arbeitsplatz führte zu der Forderung, diese künftig weitgehend zentral zu gestalten und der Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung zu übertragen. Der Benutzerservice der Abteilung entwickelte eine Domain-Struktur mit Werkzeugen zur Administration von PC unter MS-NT und installierte eine zentrale Ressource-Domain. Gemeinsam mit der Kommission für Datenverarbeitung wurden Maßnahmen zur Vereinheitlichung und Harmonisierung der PC-Welt am FZR eingeleitet, z. B. durch die Definition von Standard-PC.

Der Benutzerservice der Abteilung beschaffte für die dezentrale Rechentechnik am Forschungsstandort im Jahr 1998 insgesamt 648 Software-Produkte im Gesamtwert von 740 TDM.

Die Abteilung betreibt den WWW-Server des Forschungszentrums.

Mitarbeiter der Abteilung waren in Projekte von Instituten, z.B. in das ELBE-Projekt, einbezogen.

### Zusammenarbeit mit externen Partnern

Die Abteilung arbeitete sehr eng insbesondere mit der TU Dresden zusammen. Das betraf vor allem die Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften (wissenschaftliches Rechnen, Physik) sowie die Fakultät Informatik (Rechnersysteme, Datennetze) und die Medizinische Fakultät (Nuklearmedizin, Multimedia). Darüber hinaus gab es wesentliche Kooperationen mit folgenden Einrichtungen: DFN-Verein, DIGI, KODA der HGF, EDV-Arbeitskreis der WGL, AG NT-PC der HGF, AG Graphische Datenverarbeitung der HGF, AVS-Competence Center Ulm, CONVEX/HP-User-Group Germany, NAG-User-Association Oxford/Großbritannien, VIK und Universität Dubna/Russland.

### Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

Mitarbeiter [Planstellen]										
Gesamt		15/14			Wissenschaftler			5/5		
Annexpersonal [Anzahl   Personenjahre]										
Doktoranden	1/-	0,2/-	Gastwissenschaftler	3/5	0,1/0,4	Hilfskräfte	1/1	0,1/0,2		
Geräteinvestitionen [TDM]										
grundfinanziert		904,9/98,8			drittmittelfinanziert					
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]										
Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster		2/1								

Abteilungsleiter

Dr. R. Fülle

Tel.: (0351) 260-3264

e-Mail: R.Fuelle@fz-rossendorf.de

# PROJEKTGRUPPE ESRF-BEAM-LINE

## Überblick über die Zielstellung

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

- radiochemische Untersuchungen mit Röntgenabsorptionsspektroskopie und
- materialwissenschaftliche Untersuchungen mit Diffraktion und Reflektometrie

werden vom FZR und seinen Kooperationspartnern genutzt.

## Wichtigste Ergebnisse

Im 1. Halbjahr 1998 wurde die Ausrüstung des Materialforschungsmessplatzes (MRH) durch zusätzliche Detektoren vervollkommen. Neben der Charakterisierung der Röntgenstrahlparameter mit Diffraktionsmethoden wurden erste Experimente durchgeführt. Die Glovebox für den Radiochemiemessplatz (RCH) mit allen Spezialanbauten wurde im FZR fertiggestellt, nach Grenoble überführt und in Betrieb genommen. Die offizielle Einweihung von ROBL fand am 08.06.1998 statt.

Im zweiten Halbjahr 1998 stand die Erprobung des Radiochemiemessplatzes im Vordergrund. Daneben wurden an beiden Messplätzen Experimente durchgeführt, die neben den wissenschaftlichen Zielstellungen auch zur Austestung der Komponenten, ihres Zusammenwirkens und der Prüfung der Reproduzierbarkeit von Messungen dienten. Die Auflösung bei der Röntgendiffraktion wird durch die Detektorgeometrie dominiert, und die Spitzenwerte der dedizierten Pulverdiffraktionsmessplätze der ESRF können auch bei ROBL erreicht werden. Die sehr hohe Reproduzierbarkeit des Goniometers in MRH ermöglicht auch präzise Einkristalluntersuchungen. Die energetische Auflösung mit dem Si(111)-Monochromator ist besser als die natürliche Core-hole-Lebensdauer der K- bzw. L-Kanten. Damit ist bei EXAFS eine Vermessung der Kantenstruktur ohne gerätebedingte Verzerrungen möglich. ROBL hat seine projektierten Leistungsparameter realisiert und ist in der Qualität analogen Messplätzen der ESRF ebenbürtig.

Im ganzen Berichtszeitraum wurden die technischen Systeme der Steuerung und Überwachung der Beamline vervollkommen. Schwerpunkte waren die Verbesserung der Steuerung von Optik und Messeinrichtungen unter Berücksichtigung erster Betriebserfahrungen, Erhöhung der Nutzerfreundlichkeit von Bedienoberflächen (wichtig für Fremdnutzer), die Vervollständigung des Sicherheitssystems der Radiochemiehütte (z.B. zusätzlicher Absolutfilter) und die Stabilisierung der Strahldiagnostik. Verbesserungen der mechanischen Stabilität des Monochromators für EXAFS-Messungen wurden mit der Herstellerfirma in Angriff genommen.

Thematisch sind die FZR-eigenen Experimente vor allem in die Forschungsprogramme der Institute für Radiochemie sowie Ionenstrahlphysik und Materialforschung integriert. Erste Experimente von Gastgruppen wurden bei MRH ab Frühjahr 1998 und bei RCH ab Ende 1998 durchgeführt.

Als repräsentative Untersuchungsschwerpunkte seien genannt:

- Studium der Grenzflächenrauigkeit in Multischichten mit Reflektometrie
- Identifikation von SiC-Kristalliten nach Implantation von C in Si bzw. der ionenstrahlinduzierten Rekristallisation
- Ermittlung von Spannungen in Multischichten, in Metallen bei Wasserstoffbeladung oder in ultrafeinkristallinem Nickel
- Präzisionsbestimmung von Atompositionen in verschiedenen Modifikationen von SiC-Einkristallen
- EXAFS-Strukturuntersuchungen zur Sorption von Uran und anderer Schwermetalle an Gesteinen und Mineralen, Identifizierung der Oberflächenkomplexe und zu radiopharmazeutischen Re- und Tc-Modellkomplexen
- Es war erstmalig möglich, wässrige Neptuniumkomplexverbindungen in den Oxidationsstufen Np(IV), Np(V) und Np(VI) zu präparieren und zu untersuchen.
- Bei Modellversuchen an einer 0,1 M Per-technetatlösung wurde das Technetium-K-Kante EXAFS-Spektrum über den 2,5 fachen Energiebereich eines gewöhnlichen EXAFS-Spektrums gemessen.
- Bestimmung der Struktur der lokalen Umgebung von Actiniden in wassergelösten Komplexen

- Unterscheidung von Oxidationszuständen des Neptunium in Lösung durch Nahkanten-spektroskopie
- EXAFS-Untersuchungen zur Komplexbildung von Uran mit Huminsäuren.

### Zusammenarbeit mit externen Partnern

Hauptpartner der Zusammenarbeit hinsichtlich der Inbetriebnahme und Verbesserung der Ausrüstung von ROBL sind die ESRF, der VKTA, HASYLAB bei DESY, das Lawrence Berkeley National Laboratory und die LMU

München. Des Weiteren wurden in Zusammenarbeit mit 16 Gruppen von Instituten und Universitäten Experimente an ROBL durchgeführt. Im Berichtszeitraum waren dies: TU Dresden; IFW Dresden; LMU München; Universität Strasbourg; Universität Aarhus; FSU Jena; ILL Grenoble; AMD Dresden; Institut für Kernphysik FZR/AdW-Institut Jerewan; PSI Villigen; Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie, FZR; Royal Institute of Technology, Stockholm; Institut of Nuclear Physics, Orsay; CEA Cardarache; Katholische Universität Leuven.

### Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

Die Projektgruppe setzt sich aus Mitarbeitern des Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung, des Instituts für Radiochemie und der Zentralabteilung für Forschungs- und Informationstechnik zusammen. Die Mitarbeiter sind in der Regel nur zu einem Teil ihrer Arbeitszeit in der Projektgruppe tätig. Wissenschaftliche Veröffentlichungen werden hier nur ausgewiesen, sofern sie sich direkt auf ROBL beziehen. Weitere Arbeiten wurden in der Statistik der o.g. Institute erfasst.

Geräteinvestitionen [TDM]			
grundfinanziert	416,1/15,5	drittmittelfinanziert	
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]			
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken	-/1	Vorträge / Konferenzbeiträge / Poster	11/6
Artikel (referiert)	2/1		
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]			
Meetings / Workshops	1/-		

Leiter: Dr. W. Matz    Tel.: (0351) 260-3122    e-Mail: W.Matz@fz-rossendorf.de

# PROJEKTGRUPPE ELBE-QUELLE

## Überblick über die Zielstellung

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

## Wichtigste Ergebnisse

Die Entwurfs- und Konstruktionsarbeiten für den Kryostat-Modul wurden fortgeführt. Das betraf vor allem Gestelle und Montageeinrichtungen für die Cavities. Für das thermische Schild und das magnetische Schild wurden die Konstruktionsunterlagen erstellt und ein neues Konzept für die Kühlung mit flüssigen Stickstoff erarbeitet.

An der Stanford University wurden nach FZR-Zeichnungen Montageeinrichtungen gefertigt und mit den vom FZR gelieferten Teilen die ersten beiden Cavities montiert. Das Tuningsystem konnte am Cavity bei Normaltemperatur erprobt und die Verstellgenauigkeit nachgewiesen werden. Es folgten die Probemontage der wesentlichen Baugruppen des Kryostats und die Teil-Erprobung des thermischen Schildes.

Auf Grundlage der ersten von Stanford gefertigten Muster-HF-Koppler wurden Verbesserungen vorgeschlagen und Varianten für das Warmteil konzipiert. Die erste Serie Koppler wurde von der Stanford University gefertigt.

Die gepulste Gun für den FEL wurde fertiggestellt und am Gun-Versuchsstand montiert. Bei

der Erprobung der Gun wurde mitgearbeitet und notwendige Änderungen ausgeführt.

Für den gepulsten Injektor und dessen Baugruppen (Buncher, Diagnostik, Aperturen, Spulen usw.) wurden die Konstruktionsunterlagen erarbeitet. Der Injektor wurde montiert, der Erprobungsstand erweitert und die Erprobung betreut.

Der Aufbau des Rein- und Montageraums im ELBE-Gebäude wurde in enger fachlicher Zusammenarbeit mit dem Auftragnehmer durchgeführt.

Für den Nassarbeitsplatz im Reinraum, in dem die Reinigung von Komponenten mit flüssigen Medien erfolgen wird, wurden die Komponenten gekauft und Konzeption der Inneneinrichtung präzisiert.

Von der Werkstatt wurden folgende Baugruppen erstellt und montiert:

- Gepulste Gun
- Hochspannungsgehäuse
- 260-MHz-Buncher (1 kW)
- 1,3-GHz-Buncher (200 W)
- 5 Fokussierspulen
- 8 Viewscreen, Verstellapparatur, Kamerahalter
- Macropulsgenerator
- Gestell + Montagerahmen, Befestigungsteile für Injektoraufbauten und GUN
- Vakuumpumpstand
- Abschirmgestelle für Versuchsstand
- Hochdruck-Reiniger für Reinraum
- Messmarken für ELBE-Gebäude
- 4 Stück Messpylon für Gebäude
- Strahlfänger für 1. Ausbaustufe (Beamdump)
- 2 Stück Tuner 2000 für Erprobung in Stanford
- Flüssigstickstoff-Versorgung für Kryostat
- Rollfüße für Kesselabstützung
- Cavity-Schwenkgestell
- Ständer für Kryostat

Für das Leitsystem der Beschleunigeranlage wurden neben konzeptionellen Arbeiten eine erste Arbeitsvariante mit dem System WINCC von Siemens sowohl für den Injektorteststand als auch für die Heliumkälteanlage erstellt. Für die Bildauswertung zur Strahldiagnose wurde ein Programm für die Bildaufnahme unter Labwindows erstellt und getestet. Ein Multiplexer für die Umschaltung der Kameras wurde integriert.

Die Arbeiten zur Steuerung des Interlock-systems umfassen:

- Aufbau und Verdrahtung der Steuer- und Interlockschränke für die erste Ausbaustufe
- Erstellung der Programmteile (STEP 7) für die SIMATIC-Einleitung. Dabei wird versucht, Teile mit Programmen für den Tandemanbau gleich zu gestalten.
- Erprobung eines Teils der Steuerung am Versuchsstand
- Einbau der o. g. Schränke in die ELBE-Halle und Beginn der Verdrahtung

Für den Far-IR-FEL (25  $\mu\text{m}$  bis 150  $\mu\text{m}$ ) wurden die Berechnungen des Undulators (elektromagnetisch, ohne Waveguide) und des dazugehörigen optischen Resonators abgeschlossen und die ersten Konstruktionsentwürfe begonnen. Des Weiteren entstand das Konzept für die messtechnische Ausstattung zur Inbetriebnahme des FEL.

Die wesentlichen Komponenten für die Hochfrequenzversorgung des Injektors (Bereitstellung der Grundfrequenz, der Leistungsverstärker für die Buncher und das erforderliche Regelsystem für die Amplituden- und Phasenstabilisierung) wurden fertiggestellt und im Labor erprobt.

Im Vorfeld zur Errichtung des Injektorversuchsstandes (gepulste Variante) waren weiterhin folgende Aktivitäten nötig:

- Strahlführungsrechnungen für Injektor, 20-MeV-Abschnitt 1, vertikaler Versatz, Schikane, Strahltransport in den Beamdump
- Simulationsrechnungen zur Trioden-Gun

- Design 260-MHz-Subharmonic-Buncher und 1,3-GHz-Fundamental-Buncher
- Berechnung Energie-Spektrometer
- Konzeption Gun- und Injektor-Versuchsstand mit Trioden-Gun (gepulste Gun)
- Berechnung und Ausmessen magnetischer Komponenten (Solenoid, Steerer etc.)
- Inbetriebnahme und Ausmessen Trioden-Gun
- Inbetriebnahme Injektor (-versuchsstand)
- Konzeption Strahldiagnose (Monitore, Messverfahren, Signalerfassung und -verarbeitung)
- Design Viewer und Videosystem incl. Timing, Konzeption Bilderfassung, Bildverarbeitung
- Design und Erprobung Makropuls-Generator
- Design der Bunchlängenmessung nach der Interferometermethode

### Zusammenarbeit mit externen Partnern

Der schnelle Fortschritt der Entwicklung des High-Tech-Elektronenbeschleunigers als auch die Entwicklung des FEL im Infrarotbereich ist ohne die umfangreiche Unterstützung externer Partner aus den verschiedensten Fachgebieten undenkbar. Aus der enormen Vielzahl der Partner können hier nur einige genannt werden:

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

### Statistischer Überblick 1998/1. Halbjahr 1999

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

Geräteinvestitionen [TDM]			
grundfinanziert	2.489,6/468,5	drittmittelfinanziert	
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]			
Artikel (referiert)	3/2	Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster	1/1

Leiter: Dr. F. Gabriel Tel. : (0351) 260-3109 e-Mail: F.Gabriel@fz-rossendorf.de

# ADMINISTRATIVE UND TECHNISCHE INFRASTRUKTUR

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

Das FZR verfügte 1998 über ein Finanzvolumen von insgesamt 102,8 Mio. DM. Neben den Mitteln aus der Grundfinanzierung (85,1 Mio. DM), die jeweils zur Hälfte durch den Bund und die Länder bestritten werden, konnten knapp 13,2 Mio. DM aus zusätzlichen Förderprojekten und Drittmittelverträgen nationaler und internationaler Einrichtungen sowie der Industrie eingeworben werden. 4,4 Mio. DM wurden aus Sondermitteln bestritten.

Für den Berichtszeitraum 1999 stehen aus der Grundfinanzierung 86,3 Mio. DM zur Verfügung von denen zum Stichtag 30. Juni 1999 35 Mio. DM verbraucht wurden. Für diesen Berichtszeitraum lagen bereits Vertragsanschlüsse und Zuwendungen aus Sondermitteln von 2,56 Mio. DM und Drittmitteln in der Höhe von 13,17 Mio. DM vor.

Der hohe Investitionsanteil (34 %) der Ausgaben belegt die Zukunftsorientiertheit des FZR. Neben der Sanierung und Modernisierung der Gebäude und der technischen Infrastruktur, die auch in diesem Jahr weiter vorangetrieben wurden, sind insbesondere bei den Investitionen der Ausbau der Ionenstrahlphysik, die Sanierung des jetzt vom Institut für Kern- und Hadronenphysik genutzten Gebäudes sowie der Bau für die Strahlungsquelle ELBE als größte Einzelprojekte zu nennen.

Im Jahr 1998 standen dem FZR 435,5 Planstellen zur Verfügung, davon 17,5 mit kW-Vermerk. Im Berichtszeitraum sind 15,5 kW-Vermerke realisiert worden, so dass gegenwärtig 420 Planstellen in Anspruch genommen werden. Zum Stichtag 30. Juni 1999 beschäftigte das FZR 428 Personen auf diesen Plan-

stellen. Zusätzlich konnten aus Annex- und Drittmitteln weitere 111 Mitarbeiter, 21 Postdoktoranden sowie 42 Doktoranden beschäftigt werden. 19 Promotionen wurden im Laufe des Berichtszeitraums abschlossen. Weiterhin betreute das FZR zum 30. Juni 1999 insgesamt 24 Auszubildende in sieben Ausbildungsberufen. 14 Azubis beendeten im Berichtszeitraum erfolgreich ihre Ausbildung.

Hinsichtlich der verschiedensten rechtlichen Belange wurden die Organisationseinheiten beim Abschluss von wissenschaftlichen Kooperations- bzw. Forschungs- und Entwicklungsverträgen sowie inhaltlich auf wissenschaftliche Leistungen ausgerichtete Verträge, vornehmlich Werk- und Honorarverträge und Lizenzverträge unterstützt. Das FZR verfügt über 14 deutsche geprüfte Patente sowie weitere 50 deutsche Patentanmeldungen. Die genannten Schutzrechte werden durch 90 ausländische Patentanmeldungen international abgesichert.

Die feste Einbindung des FZR in nationale und internationale Wissenschaftskooperationen wird nicht nur in den zahlreichen Projekten zu denen Rossendorfer Forscher wissenschaftliche und technische Beiträge leisten deutlich, sondern auch an der hohen Zahl von 271 Gastwissenschaftlern aus 31 Ländern, die am Forschungszentrum wissenschaftliche Arbeiten durchführten.

Zusätzliche Mittel für die Finanzierung eigener Arbeiten und solcher Kooperationen, die 1998 für die insgesamt 159 laufenden Projekte ein Finanzvolumen von 10,4 Mio. DM umfassten (1. Halbjahr 1999 135 Projekte mit einem Fördervolumen von bereits 10,1 Mio. DM), konnten dabei nicht nur aus nationalen Programmen eingeworben werden, sondern entsprangen zu einem erheblichen Teil auch internationalen Förderprogrammen, wie z. B. Programmen der Europäischen Union. 1998 wurden 72 Projekte und im ersten Halbjahr 1999 weitere 32 Projekte neu begonnen. Von der DFG konnten 1998 1,92 Mio. DM (2,025 Mio. DM im 1. Halbjahr 1999), vom BMBF 3,4 Mio. DM (3,34 Mio. DM) und aus Projektmitteln des Freistaats Sachsen 2,35 Mio. DM (2,06 Mio. DM im 1. Halbjahr 1999) eingeworben werden.