

PAUL SCHERRER INSTITUT



Jahresbericht 2002

Allgemeiner Teil

Impressum

PSI-Jahresbericht 2002
Allgemeiner Teil

Herausgegeben durch
Paul Scherrer Institut

Konzeption und Redaktion
Beat Gerber

Gestaltung und Layout
Irma Herzog

Bildbearbeitung
Markus Fischer

Lektorat
Evelyne Gisler

Produktion
Luitgard Adrion

Porträts

Texte: Irène Dietschi, Beat Gerber, Kaspar Meuli, Giselle Weiss
Fotos: Béatrice Devènes

Bilderseiten vom Tag der offenen Tür 2002
Béatrice Devènes

Abdruck mit Quellenangabe und Belegexemplar erwünscht

Abrufbar unter
<http://www.psi.ch>

Zu beziehen bei
Paul Scherrer Institut
Informationsdienst
CH-5232 Villigen PSI
Telefon 056 310 42 61

Zusätzlich zum Jahresbericht 2002, Allgemeiner Teil (Deutsch und Englisch) sind für die Fachwelt «Scientific Reports» der PSI-Bereiche (Englisch) sowie der Jahresbericht «Logistik und Marketing» (Deutsch und Englisch) erhältlich.

Öffentlichkeitsarbeit
E-mail: pr@psi.ch

Verantwortlicher für Kommunikation
Beat Gerber
Telefon 056 310 29 16

psi forum – Das Besucherzentrum des PSI
Sandra Ruchti
Telefon 056 310 21 00
E-mail: psiforum@psi.ch
<http://www.psiforum.ch>

Umschlagbild

Flammen im Fokus: Diese Brennkammer dient am PSI der Analyse und Optimierung von Verbrennungsprozessen in Gasturbinen (Bild H.R. Bramaz).



Paul Scherrer Institut, April 2003 ISSN 1423-7261

Inhalt

2 Vorwort des Direktors

Das PSI in Kürze

4 Die Forschung

6 Forschung mit Synchrotronstrahlung (SYN):
Takashi Tomizaki – Am Steuer des Synchrotronstrahls
Von tomografierten Mäusehirnen und besonderen Nanostrukturen

12 Festkörperforschung mit Neutronen und Myonen (NUM):
Joël Mesot – Entdecker komplexer Kraftspiele
Von uralten Schwertern und modernsten Supraleitern

18 Teilchen und Materie (TEM):
Margit Schwikowski – Voller Neugier im ewigen Eis
Neues von der Sonne und strahlendem Stickstoff über der Aare

24 Biowissenschaften (BIO):
Gudrun Goitein – Die Unbeirrbare
Von einem Top-Rotationstisch und entarteten Peptiden

30 Nukleare Energie und Sicherheit (NES):
Olivier Auban – Auf grosser Skala
Von früh erkennbaren Schäden und codiertem Chemie-Know-how

36 Allgemeine Energie (ENE):
Felix Büchi – Gelassen im Rampenlicht
Von hart getesteten Brennstoffzellen und CO₂-begasten Bäumen

42 Das Benutzerlabor

44 Entwicklung des PSI als Benutzerlabor

Grossforschungsanlagen (GFA):

46 Leonid Rivkin – Noch mehr Licht auf die Materie

Projekte zum Bau & Betrieb der Forschungsanlagen

Logistik und Marketing (LOG):

52 Jost Eikenberg – Experte des stetigen Wandels

58 Verwertung von Wissen

Von der Hannover Messe bis zum Energiekonzept für China

70 Das PSI als Ausbildungsstätte

Von Doktoranden, Diplomanden, Lehrlingen und andern Bildungswilligen

78 Ereignisse 2002

Von einem erfolgreichen Satellitenstart und dem PSI als Publikumsmagnet

86 Statistik & Organisation

Das PSI in Zahlen und Organigramm, Komitees & Kommissionen





Vorwort des Direktors

Von Helden und ultrakurzen Röntgenpulsen

Helden vermitteln einfache Botschaften. Sie teilen die Welt ein in Gut und Böse, in Nutzbringendes und Nutzloses. Die Wirklichkeit ist jedoch viel komplexer – und die Wissenschaft versucht, sie zu verstehen und zu beschreiben. Die der Grundlagenforschung nachfolgende Entwicklung neuer Verfahren und Produkte erfordert wiederum geniale Ideen und grosse Geduld. Die gesamte Wertschöpfung umfasst die Leistung vieler Individuen in zahlreichen Entwicklungsschritten. Erst das plötzliche Erkennen von Zusammenhängen oder der Durchbruch am Markt ergibt eine einfach zu vermittelnde Botschaft – und ihre Überbringer erlangen den Heldenstatus. In diesem Jahresbericht porträtieren wir acht Forscherinnen und Forscher des PSI. Damit wollen wir zeigen, dass es in erster Linie engagierte Menschen sind, die kleinere und grössere Mosaiksteinchen auf dem langen Weg zum Verständnis vielschichtiger Zusammenhänge finden.

Das PSI betreibt Grossanlagen für eine nationale und internationale Benutzerschaft. Die Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) ist nun mit vier Strahllinien in Betrieb. Durch die kontinuierliche Injektion von Elektronen erreichen wir bezüglich Position und Intensität einen überaus stabilen Synchrotronstrahl – eine Weltpremiere und wichtige Voraussetzung für Lichtquellen der neuen Generation mit extrem kleinem Strahlfleck. Die Zahl der Benutzer und Benutzerinnen wächst stetig, und zusätzliche Strahllinien werden verlangt. Mehrere spektakuläre Resultate liessen im Berichtsjahr aufhorchen, z. B. die Entschlüsselung eines menschlichen Membranproteins durch Forscher der Firma Roche an der Protein-Kristallografie-Strahllinie – notabene erst das dritte Protein dieses für die Wirkstoffentwicklung wichtigen Typs, von dem Tausende noch zu erforschen sind.

Auch die anderen Benutzeranlagen erfreuen sich regen Zuspruchs. Neutronenstreuung (SINQ) und Myonspin-Resonanz (μSR) werden von der EU im 5. Rahmenprogramm unterstützt, hoffentlich ebenso die SLS im 6. Rahmenprogramm. Unsere Anlagen (inklusive Teilchenphysikstrahlen) waren wie immer überbucht, sodass nur die besten Experimentenvorschläge bewilligt werden konnten.

Begehrter Partner in Industrie- und EU-Projekten

Unser Wissen und unsere Fähigkeiten stossen vermehrt auf das Interesse der Wirtschaft. Die Basler Pharmaindustrie investiert zusammen mit der Max-Planck-Gesellschaft in eine zweite SLS-Strahllinie für Protein-Kristallografie, die Auto- und Autozulieferindustrie bekundet steigendes Interesse an unseren Brennstoffzellen und an der Verbrennungsforschung für herkömmliche Motoren. Die Elektronikindustrie unterstützt die Entwicklung siliziumbasierter Laser und strahlenharter Elektronik für Anwendungen in der Teilchenphysik und im Weltall. Die Schweizer Kernkraftwerke übernehmen einen Teil der Betriebskosten des Hotlabors. Das PSI wurde auch zu einem begehrten Partner in EU-Projekten.

Wichtig ist uns die Förderung des Forschungsnachwuchses – vor allem auf Doktorandenniveau –, die wir gemeinsam mit den beiden ETH und den kantonalen Universitäten betreiben. Zu erwähnen sind auch die Anstrengungen zur Erhaltung des technischen Wissens in der Kernenergie, wo sich eine gemeinsame Lösung von ETHZ, EPFL, den Kernkraftwerken und dem PSI abzeichnet.

Das PSI ist aber nicht nur ein erfolgreiches Benutzerlabor, sondern auch das grösste Energieforschungsinstitut des Bundes. Zentrales Thema ist die Reduktion des CO_2 -Ausstosses in der Energieumwandlung – besonders im Verkehr und bei der Elektrizitätsproduktion. Unsere Schwerpunkte dabei sind die Erzeugung von Biotreibstoffen aus Holz oder nasser Biomasse mittels Solarchemie oder Kernenergie, die Entwicklung schadstoffarmer und effizienter Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellenantriebe für Fahrzeuge und die sichere Entsorgung abgebrannter Kernbrennstoffe. Durch den gezielten Einsatz unserer Grossanlagen SLS, SINQ, μSR , Hotlabor und Solarkonzentrator bei all diesen Aktivitäten verschaffen wir uns einen Wettbewerbsvorteil. Der Forschungsaufwand für die Kernenergie wurde auf das minimal verantwortbare Mass reduziert und soll fortan konstant bleiben.

Führungswechsel in der Mitte des Jahres

Der Führungswechsel von Meinrad K. Eberle zu mir, am 1. Juli 2002, führte zu einigen organisatorischen Änderungen. Die SLS wechselte vom Projektstatus in einen eigenen Forschungsbereich (SYN), und der Bereich Grossforschungsanlagen (GFA) betreibt nun alle Beschleuniger (Zyklotrons, Synchrotron). Sicherheit ist ein zentrales Thema; der Leiter der Abteilung Strahlenschutz ist demzufolge in Personalunion auch oberster Sicherheitsverantwortlicher mit direktem Zugang zum Direktor. Doch Sicherheit ist nicht nur eine organisatorische Massnahme, sondern muss im Bewusstsein jedes Einzelnen verankert sein. Daher fördern wir eine Strahlenschutz Ausbildung, die allen Beschäftigten Rechnung trägt.

Bewährt hat sich, dass die Personalabteilung aus der Logistik ausgegliedert und selbständig wurde. Mit der Autonomie des ETH-Bereichs und dem neuen Bundespersonalgesetz hat die Abteilung neben Verwaltungsaufgaben auch eine wichtige strategische Funktion erhalten. Aufgaben wie Nachwuchsförderung, Laufbahn- und Nachfolgeplanung, Ausbildung, aber auch Kostentransparenz sind in den Vordergrund gerückt.

An dieser Stelle bedanke ich mich bei meinem Vorgänger, Meinrad K. Eberle, dass ich ein Institut mit motivierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern und grossem Innovationspotenzial übernehmen durfte. Die Ideen reichen von Femtosekunden-Röntgenpulsen, ultrakalten Neutronenquellen, raffinierten Röntgendektoren für SLS und Astrophysik, über eine Demonstrationsanlage zur Herstellung von Biotreibstoffen, die Entwicklung von Hochtemperaturmaterialien für Solarchemie und Kernenergie bis hin zum Aufbau eines Basislabors für fortgeschrittene Strahlentherapie mit Protonen.

Bedanken möchte ich mich auch für die externe Unterstützung des PSI – beim ETH-Rat, dem Eidgenössischen Departement des Innern und den eidgenössischen Räten, bei den Forschungskommissionen mit ihrer wichtigen Aufgabe der Qualitätssicherung und für die Treue und das Vertrauen unserer Kunden. Ein spezielles Dankeschön geht an die steigende Zahl von Sponsoren, welche die im Aufbau stehende Bestrahlungsanlage für tief liegende Tumoren unterstützen. Mein aufrichtiger Dank richtet sich schliesslich an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die durch ihren Einsatz zum Erfolg unseres Instituts beigetragen haben.

Ralph A. Eichler, Direktor

Das PSI in Kürze

Das Paul Scherrer Institut ist ein multidisziplinäres Forschungszentrum für Natur- und Ingenieurwissenschaften, das national und international eng mit Hochschulen, anderen Forschungsinstituten und der Industrie zusammenarbeitet. Mit seinen rund 1200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ist es das grösste nationale Forschungsinstitut – und das einzige seiner Art in unserem Land. Seine Fachgebiete sind Festkörperforschung und Materialwissenschaften, Elementarteilchen- und Astrophysik, Biologie und Medizin, Energie- und Umweltforschung.

Das PSI konzentriert sich auf Themen, die Spitzenforschung ermöglichen, zur Ausbildung der kommenden Generation beitragen und den Weg zu einer nachhaltigen Gesellschaft ebnen. Es engagiert sich für die Umsetzung neuer Erkenntnisse in der Industrie und bietet als nationales Forschungszentrum auch Dienstleistungen für Externe an.

Das PSI entwickelt, baut und betreibt komplexe Grossforschungsanlagen, die speziell hohe Anforderungen an Wissen, Erfahrung und Professionalität stellen. Es ist für die nationale und internationale Forschungsgemeinschaft eines der weltweit führenden Benutzerlabors.



Die Forschung

Porträts & Projekte aus den PSI-Bereichen

Forschung mit Synchrotronstrahlung (SYN)

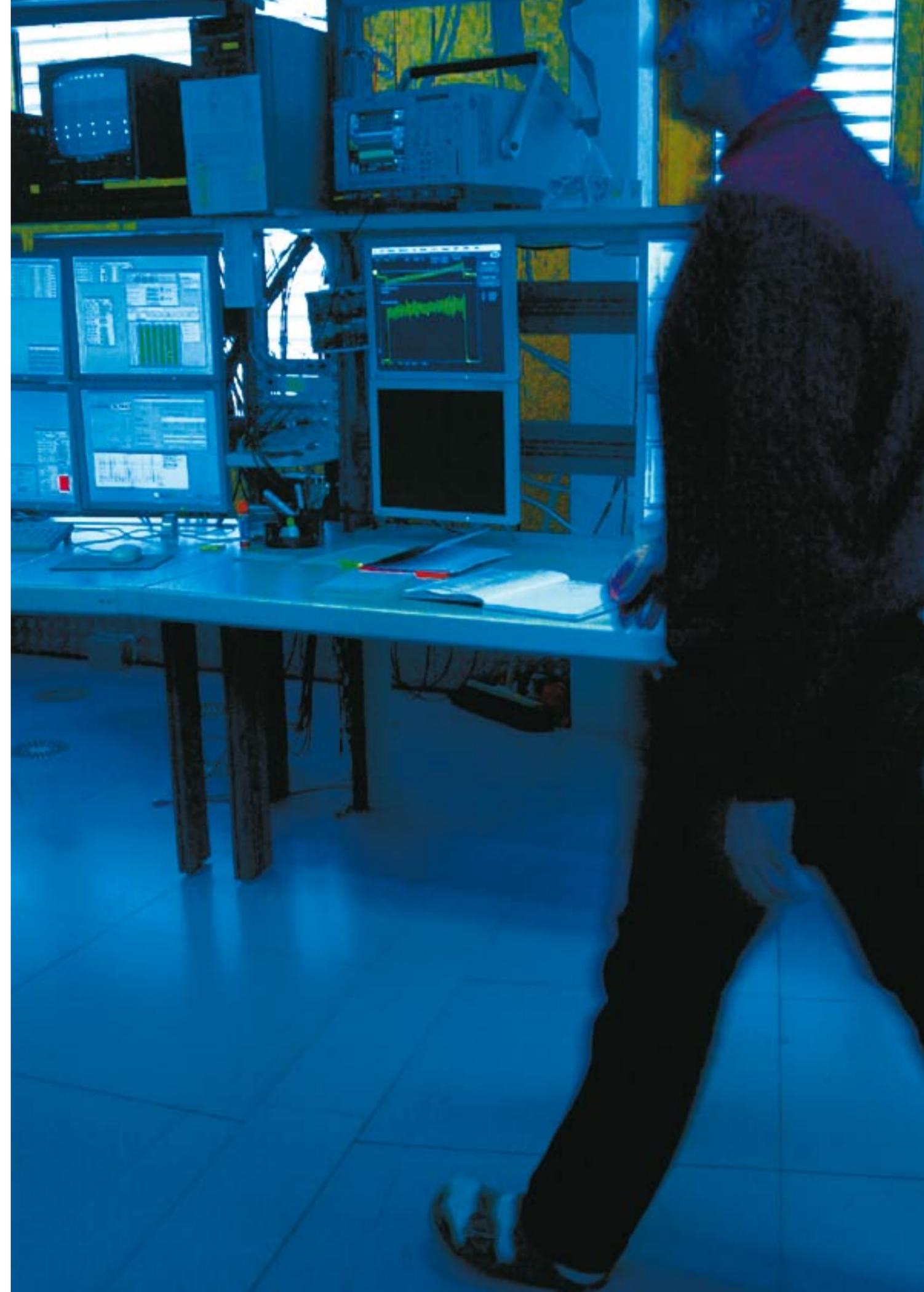
Festkörperforschung mit Neutronen und Myonen (NUM)

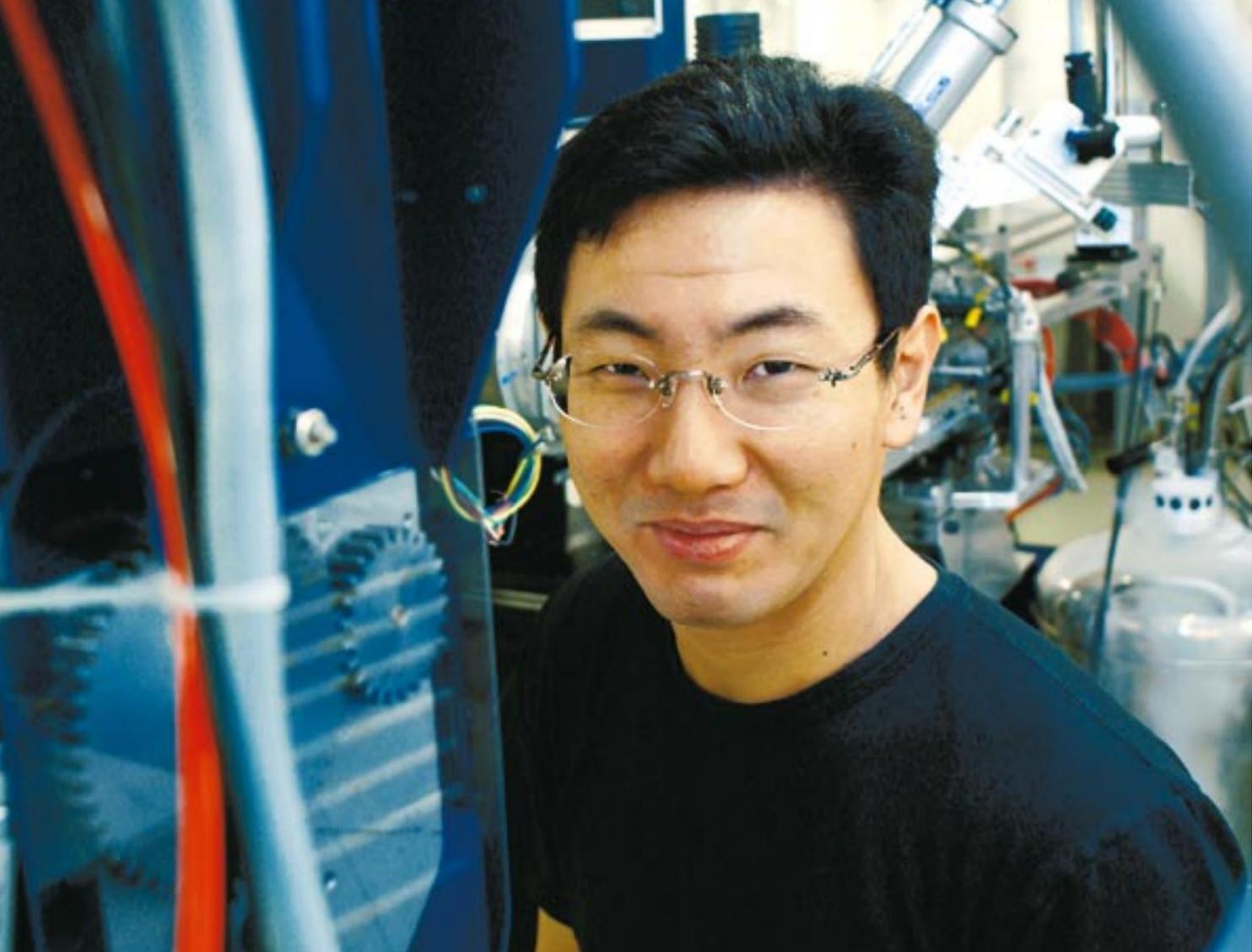
Teilchen und Materie (TEM)

Biowissenschaften (BIO)

Nukleare Energie und Sicherheit (NES)

Allgemeine Energie (ENE)





Am Steuer des Synchrotronstrahls

Takashi Tomizaki

Ein gut funktionierendes System sei wie die Luft oder das Wasser, sagt Takashi Tomizaki. Man bemerke es erst, wenn irgendetwas nicht stimme. Der Physiker optimiert am PSI die SLS-Software-Umgebung, damit die Wissenschaftler sich ganz auf die Ergebnisse konzentrieren können.

Takashi Tomizaki



Synchrotronlicht, eine elektromagnetische Strahlung, kann auch benutzt werden, um den Aufbau von Proteinen zu erforschen. Diese Strukturen sagen nicht nur viel darüber aus, wie das Leben funktioniert, dank ihnen lassen sich ebenfalls neue Arzneien entwickeln. Für solche Untersuchungen wird Licht aus dem Speicherring des Beschleunigers

entlang einer Strahllinie in eine Versuchsstation geleitet, wo Wissenschaftler damit arbeiten können – das ist der Punkt, an dem Takashi Tomizaki ins Geschehen eingreift. Tomizaki ist für die Software der Strahllinien-Steuerung zuständig. Der Einsatz von Synchrotronlicht zur Informationsgewinnung über Proteine ist eine komplizierte Sache. Der Proteinkristall muss genau im Strahl positioniert sein, damit Bilder aus vielen verschiedenen Richtungen aufgenommen werden können. Es ist noch nicht lange her, dass das Verfahren vollkommen manuell durchgeführt wurde und fotografische Filme gewechselt und entwickelt werden mussten. Heute kommen die Forscher mit Proteinkristallen, die so klein sind, dass sie sich von Hand nicht mehr ausrichten lassen. Stattdessen werden die Kristalle automatisch gedreht und mit einer digitalen Bild-

kamera abgelichtet, die nach jeder Drehung auslöst. Hinzu kommt, dass sich die Biologen der neuen Technologie angepasst haben: Seit sie sich um die Manipulation ihrer Kristalle nicht mehr zu kümmern brauchen, wollen sie die Ergebnisse so schnell wie möglich bekommen. Das bedeutet, dass alles automatisiert werde, sagt Tomizaki.

Eine Software für alle Fälle

Tomizaki stammt aus Tokushima, einer Landgemeinde in Japan. Seine Eltern waren Bauern und Tomizaki bereitete sich schon darauf vor, in ihre Fussstapfen zu treten, als er die Möglichkeit erhielt, an der örtlichen Universität zu studieren. Dort kam er mit Biologie in Berührung und war von den edlen Computern beeindruckt, die zur Bestimmung der Proteinstrukturen eingesetzt wurden. «Ich wollte einfach nur die Computer anfassen», sagt er.

Als Student schrieb Tomizaki einige Programme, die dazu beitrugen, die Struktur von Cytochrom-c-Oxidase, einem wichtigen Protein der Atmungskette, aufzulösen. Er arbeitete an einem Beschleuniger in der Nähe von Tokio und erwarb dann seinen Dokortitel an der Europäischen Synchrotron-Strahlungsanlage (ESRF) in Grenoble, bevor er 1999 zum PSI stiess. Damals hatte die SLS noch kein Dach.

Tomizaki hat eine universelle Oberfläche entwickelt, die sich für alle Anwendungsfälle eignet, und die er anhand der Rückmeldungen, die er von den Forschern erhält, weiter optimiert. Das scheint zu funktionieren. In der Anfangszeit dauerte die Auflösung einer Proteinstruktur so lange, dass man zwischendurch schlafen oder einen Skiausflug machen konnte, während der Rechner arbeitete. Heute, sagt Tomizaki, beklagten sich die Forscher darüber, dass der Prozess zu kurz sei, um einen Kaffee zu trinken.

Proteinkristalle seien anders als andere Kristallarten, sagt Tomizaki. Sie könnten hart oder weich, so gross wie eine Haselnuss oder mikroskopisch klein sein – und je nach ihrer Beschaffenheit erforderten sie unterschiedliche Behandlungs- und Messmethoden. Die Entwicklung von Software, die eine solche Bandbreite von Bedingungen abdecke, stelle eine beachtliche Herausforderung dar. Die einfachste Lösung bestehe darin, die Software auf jeden Benutzer spezifisch abzustimmen, eben so «wie einen Formel-1-Rennwagen», sagt Tomizaki. Aber dann sei die Benutzeroberfläche nicht mehr so übersichtlich und leicht zu bedienen.

Tomizaki hat eine universelle Oberfläche entwickelt, die sich für alle Anwendungsfälle eignet, und die er anhand der Rückmeldungen, die er von den Forschern erhält, weiter optimiert. Das scheint zu funktionieren. In der Anfangszeit dauerte die Auflösung einer Proteinstruktur so lange, dass man zwischendurch schlafen oder einen Skiausflug machen konnte, während der Rechner arbeitete. Heute, sagt Tomizaki, beklagten sich die Forscher darüber, dass der Prozess zu kurz sei, um einen Kaffee zu trinken.

Giselle Weiss

Zentrales Element des Stoffwechsels entschlüsselt

SLS: Synchrotron Lichtquelle Schweiz, 2001 am PSI in Betrieb genommen.

Ångström (Å): Einheit der Licht- und Röntgenwellenlänge (10^{-10} m).

Mutation: spontane oder künstlich erzeugte Veränderung im Erbgefüge.

Enzym: in der lebenden Zelle gebildete organische Verbindung, die am Stoffwechsel des Organismus mitwirkt.

ATP: Adenosintriphosphat, der wichtigste Energieträger des Organismus, dessen Energie hauptsächlich aus dem Fett- und Kohlenhydratabbau stammt.

Häm: allgemeine Bezeichnung für Metallporphyrine, z.B. ungesättigte Komplexverbindungen mit Eisen (Hämverbindungen), die zu Anlagerung von Sauerstoff, Kohlenmonoxid oder Stickstoffbasen befähigt sind.

Allrounder für alle Lebewesen

Proteine sind zwar immer aus den gleichen 20 Aminosäuren aufgebaute Eiweisskörper, aber gleichwohl gibt es Millionen von verschiedenen Proteinen unterschiedlichster Grösse und Funktion. Sie können sowohl Werkzeug, Baumaterial als auch Verwalter oder Transporteur sein. Im menschlichen Körper gibt es keine Funktion, an der nicht mindestens ein Protein beteiligt ist.

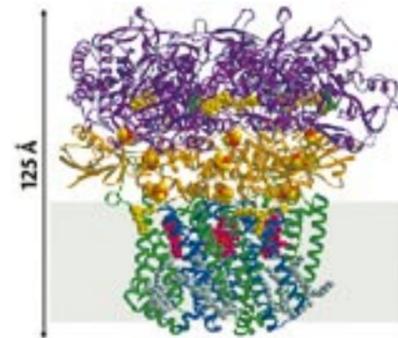
An der SLS hat ein internationales Forschungsteam die Struktur des gemeinsamen Membranproteins von Atmungskette und Zitronensäurezyklus aufgeklärt.

Wegen seiner zentralen Rolle im Stoffwechsel ist das Protein Succinat-Dehydrogenase (SDH) nicht nur wichtig für die biochemische Grundlagenforschung, sondern auch relevant für die Medizin. Es trägt wesentlich zum Verständnis der molekularen Mechanismen einer Reihe von genetisch bedingten Störungen bei, die durch Mutationen dieses Enzyms verursacht werden. Die SDH-Struktur wurde an der SLS bei einer Auflösung von 2,6 Ångström gemessen.

Mitochondrien, winzige Zellorganellen, sind die Zentren des Energiestoffwechsels, die eigentlichen Kraftwerke der Zellen. Neben der Atmungskette und der daran gekoppelten ATP-Bildung laufen in ihnen auch die Reaktionen des Zitronensäurezyklus und des Fettsäureabbaus ab. Succinat-Dehydrogenase (SDH), auch Komplex II genannt, ist dabei sowohl am Zitronensäurezyklus als auch an der Atmungskette beteiligt.

Verantwortlich für viele Krankheiten

Mutationen von Komplex II werden für eine Reihe von klinischen Krankheitsbildern verantwortlich gemacht. Dazu zählen degenerative Muskelerkrankungen, Tumoren bei Kindern sowie das Leigh-Syndrom, eine seltene, vererbte Stoffwechselkrankheit. Aus Studien bekannt ist ausserdem ein vorzeitiges Altern und eine Sauerstoffüberempfindlichkeit von SDH-mutierten Nematoden (Fadenwürmern). Als Ursache für beide Fälle wird eine übermässige Bildung von reaktiven Sauerstoffverbindungen vermutet.



Das Protein Succinat-Dehydrogenase, auch Komplex II genannt, ist Teil der Atmungskette. Dabei wird die durch Oxidation gelieferte Energie schrittweise freigesetzt und in energiereiche Bindungen investiert.

So Iwata und sein Team vom Londoner Imperial College haben an der Protein-Kristallografie-Strahllinie der SLS die hoch aufgelöste Struktur der Succinat-Dehydrogenase aufgeklärt. Damit lässt sich erstmals ihre Funktion sowie der detaillierte molekulare Mechanismus der durch Mutationen erzeugten Störungen verstehen – ein wissenschaftlicher Durchbruch.

Aufschlussreich ist der Elektronentransport. Für die daran beteiligten Moleküle konnte aus den gemessenen Distanzen die Elektronenverteilung nach der Dehydrogenierung (Entzug von Wasserstoff) von Succinat berechnet werden. Das Resultat: Ein grosser Anteil der Elektronen ist an der Hämgruppe zu finden, am Ende der Elektronentransportkette. Da das Häm in allen bekannten Succinat-Dehydrogenasen enthalten ist, wird vermutet, dass es die Bildung von reaktiven Sauerstoffverbindungen (freien Radikalen) und damit letztlich die bei Mutationen beobachteten Krankheiten verhindert. Bei den SDH-mutierten Nematoden ist wahrscheinlich der Elektronentransport (zum Häm) unterbunden, wodurch es zu oxidativem Stress kommt.

Wie Knochen und Hirn versagen

Der technische Fortschritt in Medizin, Biologie und Materialwissenschaften gründet auf dem Wissen und Verstehen von Prozessen im mikroskopischen Bereich. Neue und viel versprechende Resultate dazu liefert die Röntgen- und Mikrotomografie-Station der SLS.

Wie wirkt sich die Osteoporose auf die Struktur und Belastbarkeit der Knochen aus? In welcher Weise beeinträchtigt die Alzheimer-Krankheit die Kapillaren im Gehirn? Das sind lediglich zwei von vielen Fragen, auf welche die synchrotronbasierte Röntgen-Computer-Mikrotomografie (SRμCT) eine Antwort geben kann. Dank der aussergewöhnlichen Eigenschaften der Synchrotronstrahlung ist es möglich, auf nichtinvasive Art Einblick ins Innere einer Probe zu erhalten – unter Wahrung ihrer Struktur und chemischen Zusammensetzung. Röntgenstrahlen haben für leichte Stoffe ein hohes Durchdringungsvermögen; zudem können von einer Probe auf einfache Weise zweidimensionale Röntgenaufnahmen gemacht werden.

Solche 2-D-Projektionen enthalten räumliche Informationen des gesamten Probevolumens. Indem Projektionsbilder in verschiedenen Richtungen aufge-



nommen werden, lassen sich vollständige 3-D-Informationen gewinnen. Ausgeklügelte Software-Tools und leistungsfähige Computer helfen den Experten bei der Visualisierung und Analyse der Daten. An der SLS wurde ein SRμCT-System entwickelt, das die Untersuchung von millimetergrossen Proben mit einer räumlichen Auflösung von einem Mikrometer zulässt.

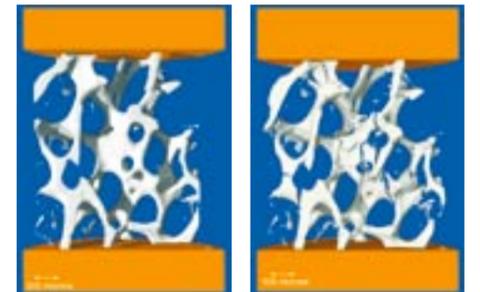
Mehr Wissen über Osteoporose

Eine Forschungsgruppe des IBT und der EMPA befasst sich mit der Untersuchung von Knochenversagen, indem sie an Knochenproben Belastungsversuche durchführt. Ein Rinderbeinknochen wurde mikrotomografisch vor und nach der Anwendung statischer und dynamischer Druckbeanspruchung untersucht. Der durch Druck und Vibration entstandene Schaden wird deutlich sichtbar und veranschaulicht den offensichtlichen Versagensverlauf.

Durch die quantitative Analyse dieses Vorgangs lässt sich im Hinblick auf osteoporotische Knochenfrakturen besser verstehen, wie die Schädigung eintritt und sich ausbreitet.

Eine andere Forschungsgruppe, darunter Wissenschaftler des IBT, der Universität Zürich und des Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien), befasst sich mit der Erforschung der Alzheimer-Krankheit (AD). Die verminderte Durchblutung des Gehirns gilt als eine der beständigsten physiologischen Defizite bei AD. Die Entwicklung von

Mausmodellen für AD, gekoppelt mit der Röntgen-Mikrotomografie, ermöglicht eine umfassende Erforschung des zeitlichen Fortschreitens der Krankheit und stellt eine Weltneuheit dar. In Verbindung mit diesen Modellen lässt sich durch genetische Induktion der pathologischen Kennzeichen sowie dank verbesserten tomografischen Techniken neues Know-how gewinnen.



Rinderknochen vor (links) und nach (rechts) statischer und dynamischer Druckbeanspruchung. Die durch die Belastung verursachten Schäden sind deutlich sichtbar.

Osteoporose: Schwund des festen Knochengewebes.

Alzheimer-Krankheit: nach dem deutschen Neurologen Alzheimer benannte Gehirnerkrankung mit fast völligem Gedächtnisverlust.

invasiv: eindringend.

Mikrometer (engl. Micron): Tausendstelmillimeter (10^{-6} m).

IBT: Institut für Biomedizinische Technik der Universität und ETH Zürich.

EMPA: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt mit Hauptsitz in Dübendorf.

Synchrotronlicht durch Tausende von Kristallkörnern

Die Instrumentierung an der SLS ermöglicht, Strukturen auch in Pulverform blitzschnell zu entschlüsseln und eröffnet neue Perspektiven für die Materialwissenschaften.

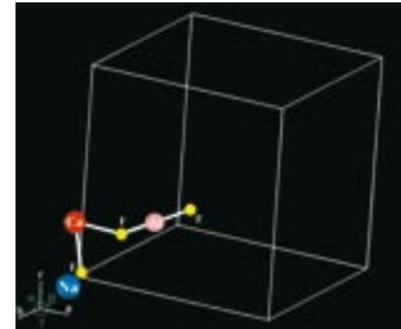
Vermutlich ist die Kristallstruktur-Analyse das breiteste Anwendungsgebiet der Synchrotron-Röntgen-Pulverdiffraktion (XRD), gewiss ist sie das älteste. Bereits 1913 hat Sir William Lawrence Bragg damit Strukturen aufgeklärt, z.B. Kochsalz NaCl. Die periodische Anordnung der Atome bewirkt, dass die Streuung eines Röntgenstrahls durch den Kristall nur in wenige bestimmte Richtungen erfolgt.

Bei fast sämtlichen Materialien vermitteln XRD-Streubilder nicht nur Informationen über ihre Kristallstruktur, sondern zeigen auch das Vorhandensein von Struktur-Phasenübergängen, Fehl-

lern, bevorzugten Kristallausrichtungen oder Belastungen, die alle einen starken Einfluss auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Materialien ausüben. Aber Einkristalle (z.B. pharmazeutische organische Moleküle) sind nicht immer verfügbar. Die Streubilder werden dann von Materialien erfasst, die in Pulverform vorliegen. Eine perfekte Pulverprobe besteht aus Tausenden und Abertausenden von Kristallkörnern, so genannten Kristalliten.

Die Strukturanalyse von Streubildern ist bei Pulver als Ausgangsmaterial jedoch erheblich anspruchsvoller als bei Einkristallen. Dank der hohen Winkelauflösung an der Experimentierstation der SLS-Strahllinie für Materialforschung lassen sich diese Schwierigkeiten vermindern. Die extrem schnelle XRD-Datenerfassung (Bilderfassung unter-

halb Millisekundenbereich) ermöglicht zudem die Durchführung zeitaufgelöster Versuche und eröffnet neue aufregende Anwendungen in den Materialwissenschaften.



Kristallstruktur von Natrium-Calcium-Aluminiumfluorid ($\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$ oder kurz NAC): Die Pulverdiffraktionsdaten wurden an der SLS gesammelt, während die Struktur mit dem EXPO-Programm der Universität Bari (Italien) aufgeklärt werden konnte.

2-D-Röntgen-Wellenleiter

Strahlungsquellen in Nanodimensionen

Am PSI konnte erstmals ein zweidimensionaler Wellenleiter hergestellt werden, der den weltweit kleinsten Spot für harte Röntgenstrahlen erzeugt.

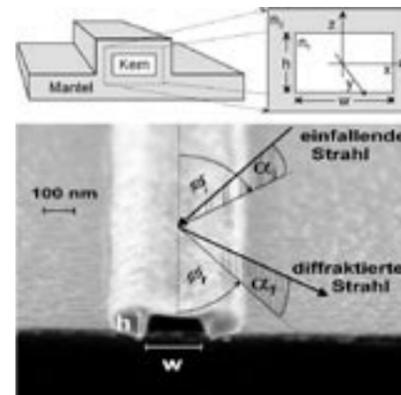
Viele interessante Experimente in der Festkörper- und Oberflächenforschung würden einen intensiven, nahezu völlig kohärenten Röntgenquellpunkt mit Abmessungen im Nanometerbereich erfordern. Besonders harte Röntgenstrahlung lässt sich jedoch nur extrem schwierig in einen kleinen Strahlfleck (Spot) fokussieren. Eine Alternative stellt die Einkopplung in einen Wellenleiter mit entsprechend kleinem Querschnitt dar. Bisher erschien aber die Herstellung eines solchen Bauteils wegen der erforderlichen Grenzflächenrauigkeiten und Fertigungstoleranzen als unrealistisch.

Doch am Labor für Mikro- und Nanotechnologie (LMN) des PSI ist es gelungen, erstmals dafür geeignete Strukturen herzustellen. Die Wellenleiter bestehen aus einem Polymerkern, der von einem dünnen Chrommantel umschlossen ist. Bei 12,4 keV Photonen-Energie betrug der am Austritt der Stirnfläche gemessene Strahlquerschnitt des Wellenleiters 68,7 auf 33 Nanometer in horizontaler bzw. vertikaler Richtung. Dies stellt somit den weltweit kleinsten Spot für harte Röntgenstrahlung dar.

Quasi-punktförmige Quelle: Oben schematisch skizziert ist ein Röntgenwellenleiter mit einer Kernbreite w und einer Kernhöhe h . Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme unten zeigt einen Wellenleiter mit $w = 120 \text{ nm}$ und $h = 60 \text{ nm}$. Bei geeigneter Wahl der Einfallswinkel α_1 und ϕ_1 lässt sich harte Röntgenstrahlung effizient in verschiedene Schwingungsmodi der Struktur einkoppeln.

Nanowissenschaft, Nanotechnik befasst sich mit Objekten, deren Abmessungen im Bereich von Nanometern liegen. Ein Nanometer (nm) entspricht einem Millionstelmillimeter (10^{-9} m).

Kohärentes Licht: Lichtbündel von gleicher Wellenlänge und Schwingungsart.



Massgeschneidertes Licht aus Silizium

In einem Versuch mit kaskadierten Quantenschichten aus Silizium und Germanium konnte erstmals Licht durch angeregte Elektronen erzeugt werden – die Grundlage für die Realisierung von so genannten Quantenkaskaden-Lasern (QCL).

Beim QCL lässt sich die Wellenlänge des Lichts je nach Anwendung genau anpassen – im Gegensatz zu herkömmlichen Lasern. Wird eine elektrische Spannung angelegt, fallen die Elektronen kaskadenartig eine energetische Treppe hinab und emittieren nach jeder Stufe Photonen (Lichtteilchen). Die Wellenlänge dieser Photonen hängt von der Stufenhöhe ab, was sich auf raffinierte Art ausnutzen lässt. Mit genau vorausgerechneten Schichtdicken erhält man eine Treppe mit lauter unterschiedlich hohen Stufen, die somit Strahlung im gewünschten Wellenlängenbereich aussenden.

In einem kürzlich am PSI ausgeführten Versuch mit kaskadierten Quantenschichten, bestehend aus Silizium (Si) und Germanium (Ge), liess sich zum ersten Mal zeigen, wie Licht durch elektrische Anregung von Quantenzustän-

den (Elektrolumineszenz) erzeugt werden kann. Solche Kaskadenstrukturen, erstmals 1994 in den Bell Labs in Murray Hill (New Jersey) demonstriert, ermöglichen die Realisierung von Infrarot-Laserlichtquellen oder eben QCL.

Revolution in der Mikroelektronik

Die Entwicklung von Laserlichtquellen auf der Basis von Silizium, dem Material aus dem PC-Prozessoren und praktisch sämtliche elektronischen Bauelemente gefertigt sind, könnte die heutige Mikroelektronik revolutionieren. Die Verschaltung elektronischer und optischer Bauelemente auf einem Siliziumchip, d.h. alle Komponenten aus gleichem Material, verspricht eine kostengünstigere und kompaktere Herstellung.

Basierend auf den Vorversuchen wird nun am PSI-Labor für Mikro- und Nanotechnologie (LMN) zusammen mit einer europäischen Forschungsgemeinschaft das QCL-Konzept auf Si/SiGe-Schichten angewandt. Erstmals wird somit versucht, Laserlicht aus einem Material zu erzeugen, das bis anhin als schlechter Emitter galt (wegen indirekter Bandlücke). Die Umsetzung dieses

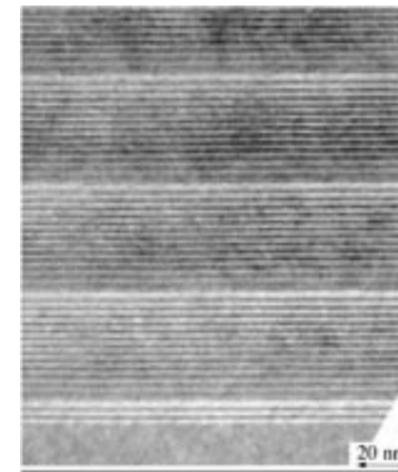
Quantensprung: Übergang des (Quanten-)Zustands eines Systems auf ein höheres oder niedrigeres Energieniveau. Dabei wird die Energiedifferenz in quantisierter Form durch ein Lichtquant bzw. Photon (Lichtteilchen) aufgenommen oder abgegeben.



Reinraum am Labor für Mikro- und Nanotechnologie (LMN) des PSI.

Konzepts stellt aber grosse Herausforderungen an die Materialherstellung und Messtechnik wie auch an die Prozesstechnologie.

Die Quantenstrukturen bestehen aus einigen hundert Nanometer dünnen Si- und SiGe-Schichten in abwechselnder Folge (siehe Bild). Die Ladungsträger sind in den SiGe-Schichten (Quantentopf) eingefangen. Legt man eine elektrische Spannung an, sollen möglichst viele Elektronen schnell von Kaskade zu Kaskade transportiert werden. Dabei senden sie ein Lichtquant aus, das bei geeigneten Strukturen den Verstärkungsprozess eines Lasers initiiert. Erforderlich für die Verstärkung ist, dass das Licht in einem optischen Wellenleiter (siehe Bild) quasi verlustfrei geführt wird. Die Forschungsgruppe am LMN will nun die verschiedenen Bauteile optimieren und aufeinander abstimmen. Sollte dies gelingen, stünde einer erfolgreichen Demonstration eines Si/SiGe-Quantenkaskaden-Lasers nichts mehr im Wege.



Treppenhüpfen für Elektronen: Multi-kaskaden-Struktur aus Silizium und Germanium (Elektronentransmissionsbild, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).



Verlustfreie Lichtführung: Chip mit optischem Wellenleiter (Waveguide: eigentliche Wellenleitung; goldfarbig: Kontaktpads; SiN_x : Isolierschicht).



Entdecker komplexer Kraftspiele

Joël Mesot

Supraleiter bei Raumtemperatur – davon träumt auch Joël Mesot, wie wohl all seine Fachkollegen. Der Romand will den widerstandslosen Stromtransport mit Neutronenspektrometern weiter enträtseln. Ein solches Instrument hat er mit seinem Team selbst entwickelt.

Joël Mesot

«Das war eine wirkliche Revolution.» Begeistert schildert Joël Mesot die explosionsartige Entwicklung bei den Supraleitern vor wenig mehr als 15 Jahren. Ausgelöst haben diesen Fortschritt Georg Bednorz und K. Alex Müller vom IBM-Labor in Rüschlikon bei Zürich. Für ihre sensationellen Resultate mit supraleitenden Metalloxiden bekamen die beiden Wissenschaftler 1987 – nur ein Jahr nach der Publikation – den Nobelpreis für Physik.

Der Forschungserfolg beflügelte Hunderte von Labors rund um den Erdball, die mit ähnlichen Materialien zu arbeiten begannen. Einige Gruppen erzielten erstaunliche Ergebnisse: Die Übergangstemperatur zur Supraleitfähigkeit stieg schlagartig bis auf minus 110 Grad Celsius – ein Riesensprung um über 120 Grad innerhalb weniger Jahre. Angesteckt von dieser Euphorie wurde auch Joël Mesot. Für den damaligen Physikstudenten an der ETH Zürich war plötzlich sonnenklar, dass er einmal auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Supraleitung forschen wird.

«Damit die Wissenschaft weiterkommt, möchten wir das Phänomen bis ins Detail verstehen», umreißt Mesot sein ehrgeiziges Ziel. Seit Oktober 1999 leitet er am PSI die Gruppe für Neutronenspektroskopie, die zum Bereich Festkörper-

forschung mit Neutronen und Myonen (NUM) gehört und teils gemeinsam mit der ETH Zürich betrieben wird. Noch ist der Mechanismus der Supraleitung nicht ein-

deutig geklärt, die Theorie unzureichend. Mit dem selbst gebauten Spektrometer misst Mesots Team die Energiezustände von magnetischen Komponenten der Elektronen in supraleitenden Kupferoxiden. Damit versprechen sich die Forscher Aufschluss über den Magnetismus, der bei der Supraleitung eine wichtige Rolle spielen könnte.

Joël Mesot ist ein Pionier, der mit seinem Forschergeist in neue Gebiete eindringt. Den 38-jährigen fasziniert das Zusammenspiel komplexer Kräfte, ausgelöst von Kristallgitterschwingungen, von Wechselwirkungen zwischen Elektronen und dem Magnetismus – eine Physikerwelt, die das herkömmliche Vorstellungsvermögen übersteigt. Seine Neugier auf den unerschlossenen Mikrokosmos verhalf Mesot auch zum Start einer erfolgreichen

Wissenschaftskarriere. Nach dem ETH-Diplom ging er ans Institut Laue-Langevin in Grenoble, um in enger Zusammenarbeit mit der ETH Zürich seine Dissertation zu verfas-

sen. Danach kam der gebürtige Fribourger für fünf Jahre ans PSI zurück, bevor er seinen Forschungshorizont am Argonne National Laboratory in Chicago erweiterte.

Mehrfach mit Auszeichnungen geehrt – im November 2002 erhielt er den begehrten Latsis-Preis der ETH Zürich –, blickt Mesot zuversichtlich in die Zukunft. An einer neuen Strahllinie der energiereichen Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) will er künftig noch tiefer in die Geheimnisse supraleitender Strukturen eindringen. Kraft für seine Arbeit schöpft der Fussballfan (Servette FC, Genève und FC Basel) aus der Familie – den zwei Söhnen und seiner Frau, ebenfalls Physikerin. Die Wurzeln seiner Berufung zur Naturwissenschaft reichen weit zurück nach Genf, wo Mesot aufwuchs. Dort hatte ihn am Gymnasium ein begabter Lehrer zur Entdeckung der unbelebten Materie inspiriert. Und nicht nur Mesot: Vier der 17 Schüler seiner Klasse studierten später Physik, ein selten hoher Anteil.

Beat Gerber



Mikroskopische Sonden messen Magnetismus

Phonon: Quant der Schwingungsenergie in einem Kristallgitter.

kohärent: von gleicher Wellenlänge und Schwingungsart.

Magnetische Fluktuationen: dynamische Bewegung der Spins von Elektronen.

Spin: Eigendrehimpuls eines Elementarteilchens.

Myonen: den Elektronen ähnliche Elementarteilchen, aber 207-mal schwerer als diese und nicht stabil.

Myonspin-Spektroskopie: Messmethode, bei der Myonen als Sonden Informationen über Eigenschaften (z.B. Magnetismus) einer Probe liefern.

YbPd₂Sn (Ytterbium-Palladium-2-Zinn): Intermetallische Verbindung, die in der so genannten Heusler-Struktur kristallisiert und supraleitend ist.

Ein internationales Forschungsteam unter der Leitung des PSI hat eine neue Erklärung für den verlustfreien Stromtransport experimentell belegt.

Supraleiter sind Materialien, die unterhalb einer bestimmten Temperatur Strom widerstandslos leiten – also ohne jeglichen Energieverlust. Wie konventionelle Supraleiter funktionieren, erklärt bis jetzt die so genannte BCS-Theorie. Sie zeigt, dass unter bestimmten Umständen Elektronen in eine anziehende Wechselwirkung zueinander treten. Als Bindeglieder dienen dabei Phononen, die kohärente Schwingungen der Atome im Kristall sind.

Für die betroffenen Elektronen ist es energetisch günstiger, Paare zu bilden statt zu ihrem vorherigen individuellen Zustand zurückzukehren. Gemäss BCS-Theorie sollen mehrere solche Paare, bekannt als Cooper-Paare, einen höchst geordneten Grundzustand namens Kondensat bilden. Das Kondensat hat eine Kohärenz mit langer Reichweite, die zur Supraleitung führt: Wenn ein

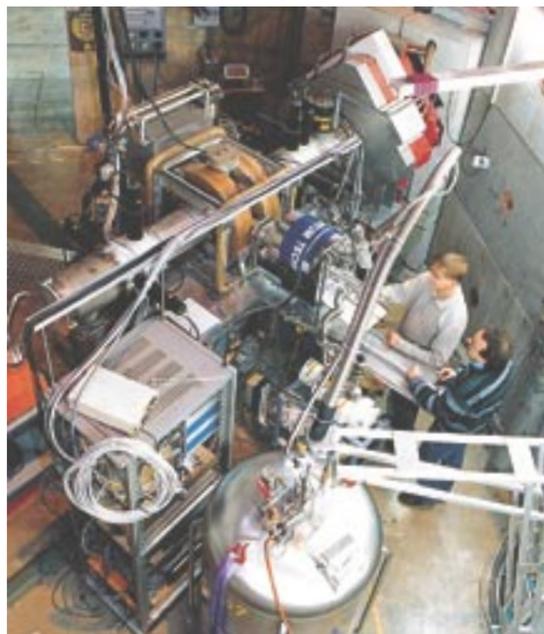
elektrisches Feld an einen Supraleiter gelegt wird, ist es den einzelnen Elektronenpaaren nicht möglich, individuell darauf zu reagieren, sondern sie bewegen sich als Ganzes (als Kondensat) ohne Widerstand durch die ganze Probe. So die herkömmliche Erklärung.

Magnetismus statt Phononen

Seit kurzem konzentriert sich grösstes Interesse auf die mögliche Existenz von so genannter unkonventioneller Supraleitung – im Sinne anderer Mechanismen als Ursprung für die Bildung von Cooper-Paaren. Als offensichtlichste Möglichkeit gilt, dass die Supraleitung in manchen Materialien eher durch magnetische Fluktuationen angetrieben wird als durch Phononen. Obwohl von zahlreichen Hinweisen auf einen solchen Zustand in verschiedenen Systemklassen berichtet wurde, fehlte bis anhin ein eindeutiger Beweis durch mikroskopische Messungen.

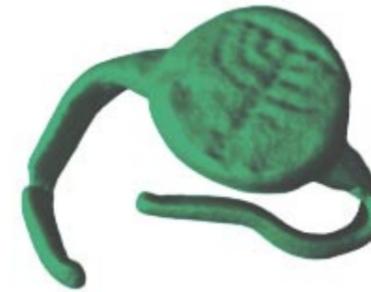
Indem die Eigenschaften von Myonen und Neutronen als mikroskopische Sonden für Magnetismus in der Materie ausgenutzt wurden, gelang es kürzlich einer Forschungsgruppe, angeführt von PSI-Wissenschaftlern, ein enges Zusammenspiel zwischen Supraleitung und magnetischen Fluktuationen zu beobachten. Magnetische Fluktuationen erschienen genau dann, als die intermetallische Verbindung YbPd₂Sn unter ihre supraleitende Übergangstemperatur von 2,3 Kelvin abgekühlt wurde.

Das Ergebnis belegt die perfekte Ergänzung zwischen zwei mikroskopischen Techniken, die am PSI für interne und auswärtige Forscher zur Verfügung stehen, der Myonspin-Spektroskopie und der Neutronenstreuung. Die Arbeit hat von der internationalen Kooperation zwischen PSI, CEA/ILL in Grenoble und Tokyo Metropolitan University profitiert.



Nutzt die magnetischen Sonden: General Purpose Surface-Muon Instrument (GPS).

Schonender Blick in die Geschichte



Bei Kaiseraugst gefunden: Römischer Ring (Tomografie) mit jüdischem Symbol (ca. 12 mm Durchmesser; 2,3 g schwer).

Damit kostbare Untersuchungsobjekte nicht beschädigt werden, sind zerstörungsfreie Methoden anzuwenden. Die Neutronen-Radiografie ist eine alternative und relativ selten eingesetzte Methode, die für viele Anwendungen Vorteile bringt.

Archäologische Fundstücke sind einzigartige Informanten über das Leben der Menschen vor Hunderten oder gar Tausenden von Jahren. Ihre genaue Analyse bringt meist neue Erkenntnisse über Zusammenhänge oder zu bisher gültigen Hypothesen der Fachleute. Angeregt durch eine europäische Forschungsinitiative (COST G8) wurden Archäologen und Museumswissenschaftler aus Schweizer Institutionen eingeladen, Untersuchungen mit der Spallations-Neutronenquelle (SINQ) in Betracht zu ziehen. Da auch grosse Museen, wie das Schweizerische Landesmuseum in Zürich, nur begrenzte Möglichkeiten an zerstörungsfreien Methoden besitzen, stellen die Grossanlagen des PSI eine einmalige Basis für zielgerichtete, wert-

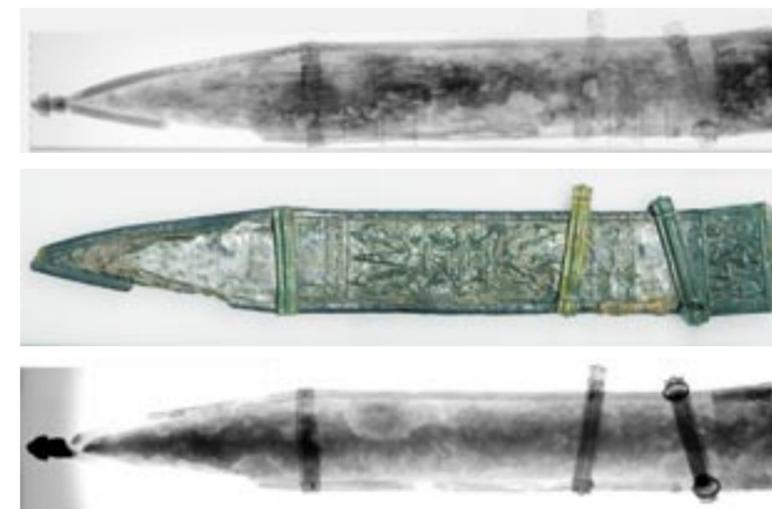
volle Studien dar. Die gewollte Synergie aus Natur- und Geisteswissenschaften kann dabei für beide Seiten bereichernd sein.

Radiografen und Archäologen

Mittlerweile ist das anfängliche Zögern der Museumsfachleute durchbrochen, und es konnten zahlreiche beeindruckende Resultate erzielt werden. Bei allen Untersuchungen ist der direkte Dialog zwischen den Spezialisten beider Seiten die wichtigste Voraussetzung für den Erfolg. Während die Neutronen-Radiografen die Objekte schlicht als Anordnung verschiedener Materialien verstehen, «lebt» die Probe für einen Archäologen durch seine Kenntnisse über das historische Umfeld sowie die Herkunft.

Die an der Anlage NEUTRA (Strahlkanal 32 der SINQ) durchgeführten Untersuchungen musealer Proben stellen stets eine Herausforderung an die jeweils einzusetzende spezifische Methode dar. Daher konnten sowohl massive Objekte wie der Zürcher Klumpen (keltischer Münzfund), ausgedehnte Proben wie das Römerschwert als auch sehr filigrane Gegenstände wie ein antiker Ring erfolgreich zerstörungsfrei beschrieben werden. Neben der direkten Transmissionsmethode wurde in einigen Fällen auch die Neutronen-Tomografie eingesetzt, die eine dreidimensionale Objektbeschreibung erlaubt.

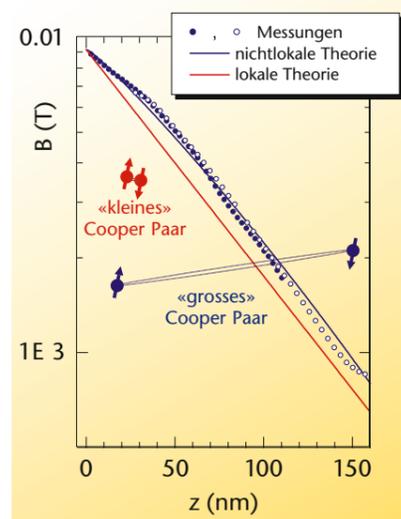
Der direkte Vergleich mit analogen Untersuchungen unter Verwendung von Röntgenstrahlen, die am PSI ebenfalls zur Verfügung stehen, kann die Informationsbasis über museale Objekte noch erweitern. Die fachliche Zusammenarbeit mit den archäologischen Fachgruppen auf Projektbasis, auch im gesamteuropäischen Rahmen, wird weiter ausgebaut.



Römerschwert vom Typ Gladius aus dem Vindonissa-Museum in Brugg (Bild Mitte). Es wurde mit Neutronen (oben) und mit 150 keV-Röntgenstrahlung (unten) zerstörungsfrei untersucht. Röntgenstrahlung liefert Auskünfte über die metallischen Bestandteile (Eisen, Bronze), Neutronenstrahlung über organische Bestandteile (Holz, Leder sowie Harz und Lack aus der Restaurierung).

Beweis für eine fast 50-jährige Theorie

Myonen: Den Elektronen ähnliche Elementarteilchen, aber 207-mal schwerer als diese und nicht stabil. Die winzigen Kompasser können Auskunft über Magnetfelder im Innern und in der Nähe der Oberfläche eines Materials geben.



Magnetfeld an der Oberfläche eines Bleifilms: Die Kurve zeigt das Zusammenspiel zwischen der Grösse der Cooper-Paare und der magnetischen Eindringtiefe.

Blau: Messungen und nichtlokale Theorie («grosse» Cooper-Paare); **rot:** lokale Theorie («kleine» Cooper-Paare); **B:** Magnetfeldstärke (in Tesla); **z:** Eindringtiefe (nm = Nanometer).



UHV-Kryostat: Der neue Ultrahochvakuum-Temperaturregler mit Probenhalter (rechts) ist eine Eigenentwicklung des PSI und sorgt für die nötige Abkühlung, damit u. a. die Messungen an supraleitenden Blei- und Niobfilmen durchgeführt werden konnten.



Mit einer am PSI entwickelten Myonspin-Rotation gelang es erstmals, in einem Supraleiter nichtlokale Effekte direkt nachzuweisen.

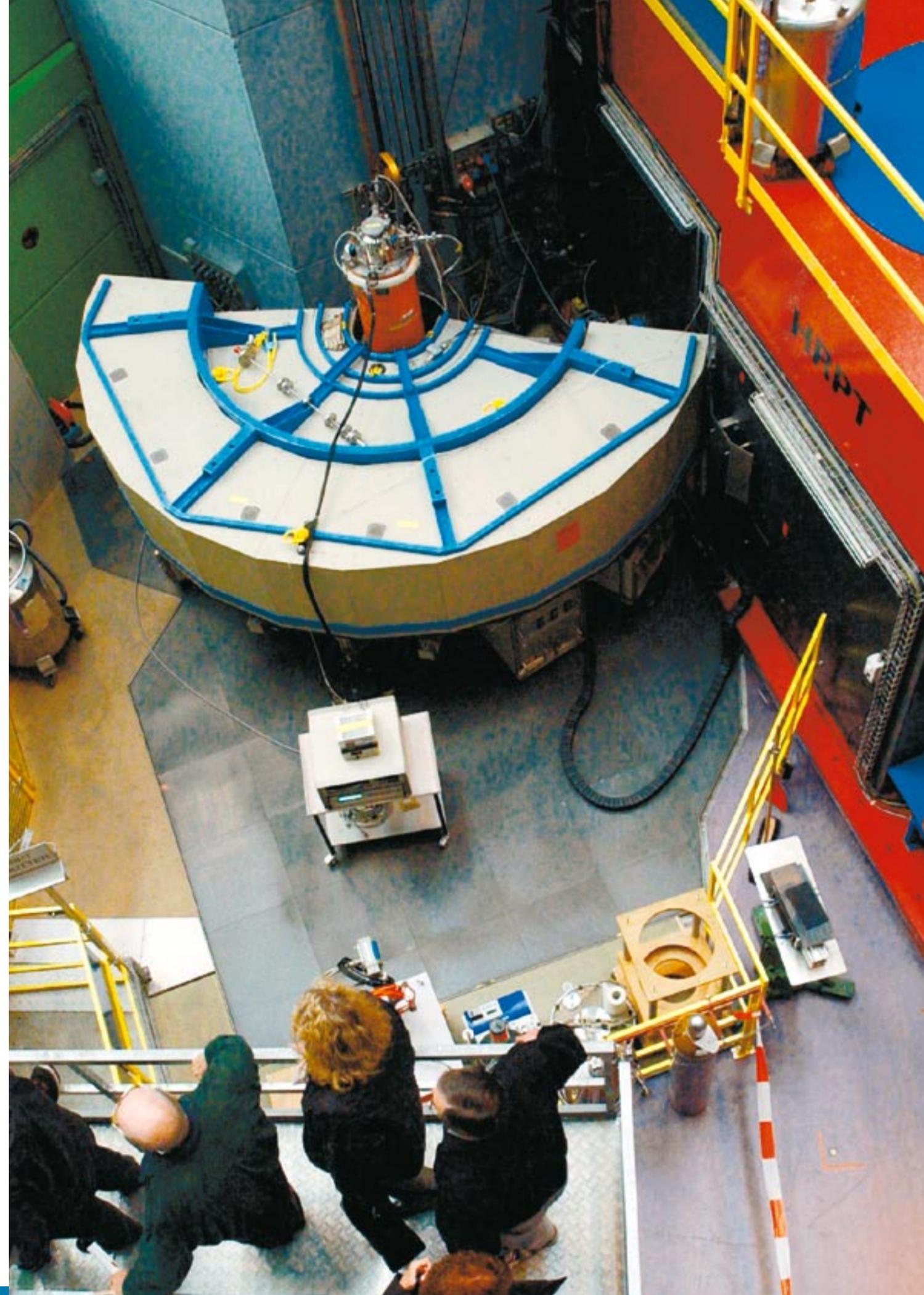
In einfachen Metallen verhalten sich Elektronen häufig so, als ob sie nicht viel voneinander wüssten. Unter gewissen Umständen aber bilden diese Elektronen Paare, die man Cooper-Paare nennt. Das geschieht bei sehr tiefen Temperaturen und ändert die makroskopischen Eigenschaften des Metalls radikal: Es wird zu einem Supraleiter, d.h. es vermag elektrischen Strom verlustfrei zu übertragen. Legt man an einen Supraleiter ein Magnetfeld an, versucht er – anders als ein gewöhnliches Metall – dieses abzuschirmen. Die Abschirmung erfolgt an der Oberfläche des Supraleiters bei einer magnetischen Eindringtiefe von wenigen bis einigen hundert Nanometern (Millionstelmillimetern).

In den meisten Supraleitern ist die Ausdehnung der Cooper-Paare viel kleiner als die magnetische Eindringtiefe (Typ-II-Supraleiter), was zu einem lokalen Zusammenhang zwischen Strom und Magnetfeld führt. In dieser Situation fällt das Magnetfeld, von der Oberfläche hin zum Innern des Supraleiters, exponentiell ab. Falls die Ausdehnung der Cooper-Paare jedoch grösser ist als die magnetische Eindringtiefe (Typ-I-Supraleiter) gilt die einfache lokale Beschreibung nicht mehr und die theoretische Erklärung wird vertrackter. Als Resultat erwartet man einen nichtexponentiellen Verlauf des magnetischen Eindringprofils.

Magnetisches Profil im Nanobereich

Zwar stammen die theoretischen Voraussagen schon aus den späten 50er-Jahren, doch konnten sie bisher nicht direkt experimentell überprüft werden, da keine Messmethode mit mikroskopischer Empfindlichkeit zur Verfügung stand. Das am PSI entwickelte Verfahren der niederenergetischen Myonspin-Rotation macht nun möglich: Extrem langsame, vollständig spinpolarisierte Myonen werden ins zu untersuchende Material implantiert. Sie wirken dort als lokale Magnetfeldsonden und erlauben ein Ausmessen magnetischer Profile im Nanometerbereich.

Mit der Methode wurden erste Untersuchungen an Blei- und Niobfilmen durchgeführt, die einen deutlich nichtexponentiellen Abfall des Magnetfelds zeigen. Es ist der erste direkte Nachweis nichtlokaler Effekte in Supraleitern. Die detaillierte Analyse der Kurvenform ermöglicht, wichtige Modellparameter direkt zu bestimmen, z.B. die Ausdehnung der Cooper-Paare oder die magnetische Eindringtiefe.





Voller Neugier im ewigen Eis

Margit Schwikowski

Ihre Liebe zu Gletschern und Hochgebirge entdeckte die Flachländerin per Zufall. Heute möchte sie den abenteuerlichen Teil ihres Forschungsalltags nicht mehr missen.

Margit Schwikowski

Süllberg hiess der einzige Berg, mit dem Margit Schwikowski in ihrer Jugend nähere Bekanntschaft schloss. Er stand an der Elbe und war 60 Meter hoch. Doch dann verschlug es die Hamburgerin ans PSI oder, besser gesagt, während zwei Monaten aufs Jungfrauoch, wo sie bei einem Projekt anheuerte, das den Transfer von Spurenstoffen aus der Atmosphäre in den Schnee zum Inhalt hatte.

So weit, sagte sich die Chemikerin, war dieses Vorhaben schliesslich nicht vom Gegenstand ihrer Dissertation entfernt: dem Eintrag von Stickstoffverbindungen in die Nordsee. Ein Thema, bei dem Schwikowski auf den Geschmack von Feldforschung gekommen war – und zwar unter eher ungemütlichen Bedingungen. Ihre Luft- und Niederschlagsproben entnahm sie auf hoher See. Vom Schiff, vom Flugzeug und von einer Plattform aus. Ein gewisses Flair fürs Extreme ist Margit Schwikowski nicht abzusprechen. Denn heute ist sie als Spezialistin für Gletscherbohrungen jeweils wochenlang mit Zelt und Schlafsack im Hochgebirge unterwegs – ob Alpen, Anden oder sibirisches Altai-Gebirge. Aber auch am PSI bewegt sie sich in einsamen Höhen.

Als stellvertretende Leiterin des Labors für Radio- und Umweltchemie ist Schwikowski eine der wenigen Frauen auf den obersten Sprossen der Karriereleiter. «Diese Art von Laufbahn ist nur möglich», sagt sie, «weil mein Mann und ich einen



Regionale Klimaarchive anbohren

kompletten Rollentausch vollzogen haben». Er kümmert sich um Haushalt und die 11-jährige Tochter, sie bestreitet den Lebensunterhalt. Was sich als gangbarer, wenn auch nicht eben idealer Weg erwiesen habe.

Tatsache ist, dass Schwikowskis Präsenz in der Gruppe für Analytische Chemie Spuren zieht. Als sie hier 1990 ihre Stelle antrat, war sie die einzige Wissenschaftlerin – heute sind mehr als die Hälfte Frauen. Nicht etwa weil sie Frauen speziell gefördert habe. «Vielleicht ist es für Studentinnen einfach anziehender in einer gemischten Gruppe zu arbeiten.»

Schwikowskis Team ist zur Hauptsache mit der Analyse der gebohrten Eiskerne beschäftigt. Ziel: Anhand der im Gletscher gespeicherten chemischen Daten das Klima der letzten Jahrhunderte zu rekonstruieren. Lange Zeit setzte die Klimaforschung zu diesem Zweck nur auf

Bohrkerne aus Grönland und der Antarktis. Die weit weniger mächtigen Hochgebirgsgletscher liess man links liegen. «Inzwischen», so Schwikowski, «zeigt sich eine Trendwende. Heute ist klar, dass für das Verständnis der Klimamechanismen auch die regionalen Archive wichtig sind.»

So zahlt sich denn aus, dass die Gletscherforscher am PSI früh ihre eigene Bohrtechnologie entwickelt haben. Leichtes und flexibel zu handhabendes Gerät, das sich in grösste Höhen transportieren lässt. Oder in eine der unwirtlichsten Gegenden überhaupt: das patagonische Inlandeis. Dort plant Margit Schwikowski die erste Gletscherbohrung überhaupt. Tatsächlich, diese Frau ist mit einer gehörigen Portion Abenteuerlust gesegnet.

Kaspar Meuli

Strahlender Stickstoff über der Aare

Radionuklid: Atomkern (Nuklid), der Strahlung aussendet und sich dabei in einen andern Atomkern verwandelt.

Target: Material, auf das energiereiche Strahlung gelenkt wird, um darin Kernreaktionen zu erzielen und/oder neue Teilchen freizusetzen.

Die Teilchenbeschleuniger auf dem PSI-Westareal ermöglichen die Produktion kurzlebiger Radionuklide. Im Projekt PROTRAC wird ein radioaktives Stickstoffisotop in gasförmiger Form hergestellt und für Experimente der Atmosphärenchemie eingesetzt.

Mit einem radioaktiven Isotop markierte Moleküle können in einem Experiment während ihrer Wechselwirkung mit einer Oberfläche von aussen beobachtet werden. Damit lassen sich Prozesse unter realitätsnahen Bedingungen im Modellexperiment studieren. In den letzten zehn Jahren wurde am Labor für Radio- und Umweltchemie des PSI diese Technologie unter Verwendung des Stickstoffisotops ^{13}N entwickelt, um Oberflächenprozesse in der Atmosphäre zu untersuchen – z.B. die Wechselwirkungen verschiedener Stickoxidmoleküle mit Eis und Aerosolpartikeln, wie sie typischerweise in der Atmosphäre vorkommen. Sie sollen Aufschluss darüber geben, wie sich solche oberflächenchemische Prozesse auf

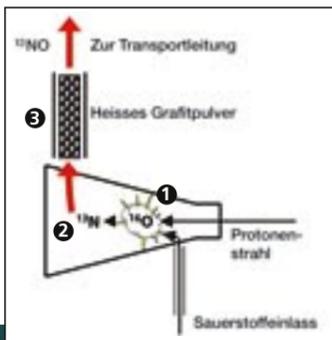


Die Transportleitung endet im Labor.

den Ozonhaushalt und aufs Klima auswirken.

Die Experimente wurden bisher während weniger Strahlzeiten am Philips-Zyklotron durchgeführt. Eine Weiterentwicklung der Methode war jedoch nur möglich, wenn unsere Experimente sich stationär und routinemässig betreiben lassen. Deshalb wurde beschlossen, die Produktion vom Philips-Zyklotron an den Protonenbeschleuniger (Injektor 2) zu verlagern und die ^{13}N -Isotope durch eine 580 Meter lange Gasleitung ins neue Laborgebäude im Ostareal zu transportieren. So werden die Isotope regelmässig verfügbar sein und eine optimale Anbindung an unsere übrige Infrastruktur ermöglichen.

Die Leitung, ein Kunststoffschlauch mit 4 mm Innendurchmesser, ist in dreifacher Ausführung in einem 30 mm dicken Schutzrohr verlegt. Auch die übrigen gasführenden Installationen sind doppelwandig ausgeführt. Der Zwischenraum wird mit Stickstoff gespült, der permanent überwacht wird, um Lecks sofort entdecken zu können. Vor der Inbetriebnahme Mitte Dezember 2002 wurde die Anlage mit einer kürzeren Leitung innerhalb des Westareals ausgiebig getestet. Nun steht die gesamte PROTRAC-Anlage der Forschung zur Verfügung.



Vom Protonenbeschleuniger ins Forschungslabor: 1. Ein Strahl des Protonenbeschleunigers (Injektor 2, PSI West) trifft im Target auf Sauerstoffmoleküle. In einer Kernreaktion wird aus Sauerstoff das Isotop ^{13}N gebildet. 2. Das ^{13}N verbindet sich mit den verbleibenden Sauerstoffmolekülen und verschiedenen Radikalen zu H^{13}NO_3 . 3. Das Gas wird über ein 300°C heisses Grafitpulver geleitet. Dadurch wird in einer Oberflächenreaktion H^{13}NO_3 zu ^{13}NO reduziert. 4. Der gesamte Gasstrom mit den Spuren von ^{13}NO wird durch einen 580 m langen Schlauch über die Aarebrücke ins neue Forschungslabor geblasen und zum Experimentieren eingesetzt.

Gewaltige Eruption auf der Sonne

Der Satellit HESSI, bestückt mit Instrumenten aus dem PSI, liefert Bilder sowohl mit wesentlich grösserer Ortsauflösung wie auch bei höherer Temperatur als andere Satelliten.

Aus frühern Beobachtungen weiss man, dass die Sonnenatmosphäre von starken Magnetfeldern durchsetzt ist. Das

materiebeladene Magnetfeld verhält sich ähnlich wie eine mechanische Feder, deren Endpunkte an der Sonnenoberfläche eingespannt sind und durch Konvektionsbewegungen verdrillt werden. Die aufgestaute potenzielle Energie entlädt sich in gewaltigen Eruptionen, wodurch das gesamte Plasma

beschleunigt und auf weit über 10 Millionen Grad aufgeheizt wird. Die frei werdende Energie ist 30'000-mal grösser als die jährliche elektrische Energieproduktion von Europa. Diese Prozesse sind wissenschaftlich schlecht verstanden und werden von HESSI beobachtet (siehe auch Seite 80).



Auf Beobachtungstour: Satellit HESSI, 600 km über der Erde.

Aus den HESSI-Bildern lässt sich erkennen, dass ursprünglich nur eine einzelne, lokalisierte, etwa 10 Millionen Grad heisse Wolke (rot) vorhanden ist (0.47 Uhr). Zu einer späteren Zeit (1.23 Uhr) leuchten zwei hoch energetische, lokalisierte Quellen (blau) auf, die als Fusspunkte eines magnetischen Bogens interpretiert werden. Die Tatsache, dass diese beide Quellen gleichzeitig aufleuchten, lässt einen gemeinsamen Beschleunigungsmechanismus vermuten.

feld sein, das durch den Kollaps der solar-globalen Magnetfeldstruktur induziert wurde. Ein alternatives Modell geht von magnetischer Rekonnexion (Kurzschluss) aus. Dank seiner einmaligen Orts- und Spektralaufklärung ermöglicht HESSI erstmals die konkrete Verifikation derartiger Modelle.

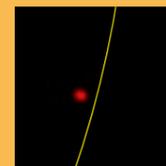
Kollaps der solaren Magnetfeldstruktur

Am 21. April, um ca. 1 Uhr, trat ein besonders interessantes Ereignis auf, das vorerst vom EIT-Instrument des SOHO-Satelliten aufgenommen wurde. Das Bild der ganzen Sonne bei (ca. 60'000 Grad) zeigt, dass die Eruption am Sonnenrand stattfand (kleines Quadrat).

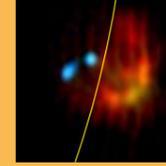
HESSI vermag diese Region jedoch mit wesentlich höherer Ortsauflösung und bei höherer Energie (Temperatur) abzubilden. Die kleinen Bilder von HESSI und die Grafik dokumentieren die Entwicklung der Eruption zu verschiedenen Zeiten. Das Diagramm stellt den gesamten, von HESSI detektierten harten Röntgenfluss in drei verschiedenen Energiebändern dar. In der gleichen Farbskala sind die Erscheinungen in den Bildern links daneben präsentiert (Energie der Röntgenstrahlung – tief: rot; mittel: gelb; hoch: blau). Um 1.31 Uhr tritt HESSI in den Erdschatten.



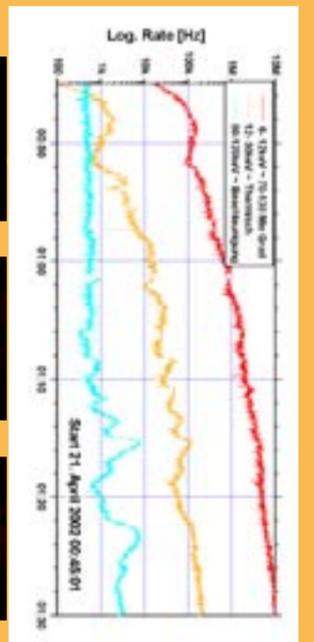
00:47



01:23

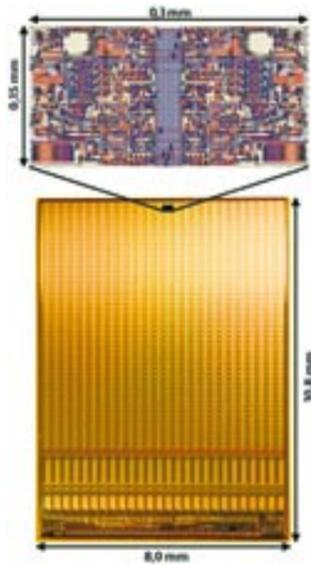


01:28



40 Millionen Bilder pro Sekunde

CERN: Europäisches Labor für Teilchenphysik in Genf. Dort wird zurzeit ein gigantischer Teilchenbeschleuniger gebaut, der Large Hadron Collider (LHC).



Der Auslesechip: Im unteren Teil sind Datenspeicher und Steuerelemente sowie 40 Anschlüsse angeordnet. Im oberen Teil befinden sich 52x53 Pixelzellen. Der Ausschnitt zeigt die Transistorauslegung eines Pixelzellenpaars. Auf den beiden hellen Flächen wird das Signal vom Detektorpixel über Lotkugeln eingespiessen.

Das PSI ist an einem Grosseperiment am CERN beteiligt und entwickelt dafür einen neuartigen Pixeldetektor. Auf dem langen Weg zum Ziel wurde 2002 ein wichtiger Meilenstein erreicht.

Der Begriff Pixel wird am ehesten verbunden mit einer Digitalkamera, wo Bilder sich punktweise auf einem in viele kleine Flächen (Pixel) segmentierten Elektronikchip registrieren lassen. In ähnlicher Weise sollen in einem Experiment am CERN Flugbahnen von geladenen Teilchen mit Hilfe hoch auflösender Detektoren aufgezeichnet werden. Jedes Teilchen hinterlässt beim Durchfliegen durch den Detektor ein elektrisches Signal im getroffenen Segment (Pixel). Mit mehreren Detektorlagen lassen sich dann die Flugbahnen der Teilchen rekonstruieren.

Die Anforderungen an diesen Detektor sind enorm: Pro Sekunde müssen 40 Millionen Bilder von Bahnpunkten geschossen und in komprimierter Form am Ort des Detektors zwischengespeichert werden. Etwa jedes tausendste Bild wird als interessant für die Weiterverwendung beurteilt und zur Datenverarbeitung weitergeschickt. Alle von einem Teilchen getroffenen Pixel mel-

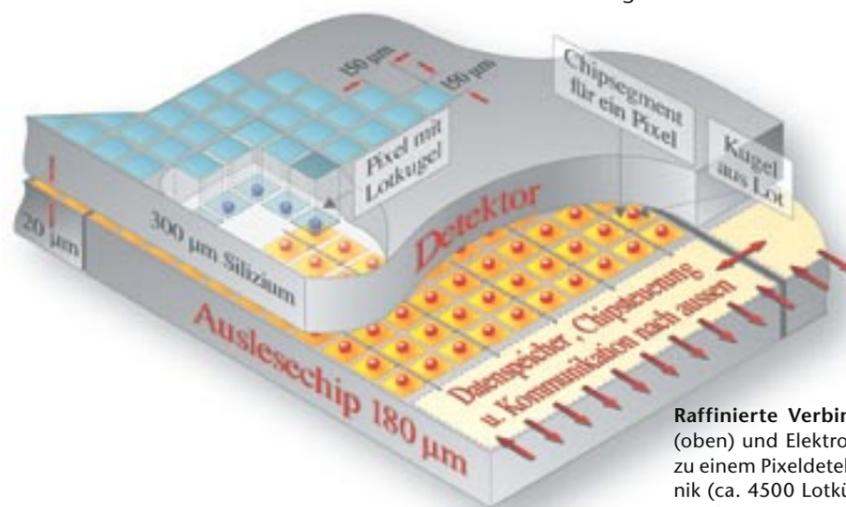
den sich selbständig, damit der Treffer sich als Punkt im korrekt zugeordneten Bild eintragen lässt. Der Punkt besitzt auch eine «Farbe» (Stärke des Signals). Besonders erschwerend ist, dass Bildaufnahme und deren Speicherung sowie die selektive Weiterleitung simultan funktionieren müssen.

Von der Simulation zur Herstellung

Der PSI-Pixeldetektor besteht aus einer dünnen, segmentierten Siliziumscheibe, wo die Treffersignale erzeugt werden, und aus einem komplexen Elektronikchip, der die Treffersignale registriert und verarbeitet (siehe Illustration). Auf diesen Auslesechip konzentrierten sich unsere Anstrengungen in den letzten fünf Jahren. Die Entwicklung erfolgte in verschiedenen Schritten: Von der Simulation des Experiments zur Ermittlung der Trefferhäufigkeiten, um die Bildspeicher zu dimensionieren, über die Auswahl einer Chiparchitektur mit minimalem Datenverlust und der Auslegung des Chips auf dem Transistorniveau bis hin zur Herstellung bei einer Firma (siehe auch Seite 67). Das Resultat ist ein Chip mit 430'000 Transistoren auf einer Fläche von knapp einem Quadratmeter (Bild links).

Im Sommer 2002 wurde ein Prototyp des Chips in einem Teilchenstrahl des PSI erfolgreich getestet. Dabei wurden Bedingungen simuliert, wie sie am CERN im Experiment zu erwarten sind. Für den ganzen Detektor, der im Jahr 2007 betriebsbereit sein soll, werden rund 12'000 solcher Chips benötigt. Dies entspricht einer Fläche von ca. einem Quadratmeter mit insgesamt 32 Millionen Pixel.

Raffinierte Verbindung: In Pixel segmentierte Siliziumscheiben (oben) und Elektronikchips (unten) werden durch Bump-Bonding zu einem Pixeldetektor vereinigt. Die hochdichte Verbindungstechnik (ca. 4500 Lotkugeln/cm² mit 15 Mikrometer Durchmesser) wurde am PSI entwickelt. 1 Mikrometer (µm) entspricht 1 Tausendstelmillimeter.



Neue Wege in der Altersbestimmung

Das Labor für Ionenstrahlphysik des PSI geht bei der Radiokarbon-Methode neue Wege und hat dazu mit der ETH Zürich ein neuartiges Massenspektrometer gebaut.

In vielen Forschungsprojekten der Umwelt- und Naturwissenschaften ist eine zuverlässige Altersbestimmung von entscheidender Bedeutung. Das erfolgreichste Verfahren ist die ¹⁴C-Methode, die auf dem radioaktiven Zerfall des Kohlenstoffisotops ¹⁴C beruht. Heutzutage wird der ¹⁴C-Gehalt einer Probe mit Hilfe der Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS) bestimmt. Zusammen mit der ETH betreibt das PSI auf dem Höngerberg eine der weltbesten AMS-Anlagen.

Der Nachweis des Radiokohlenstoffs ist extrem schwierig, da die ¹⁴C-Atome nur in geringsten Konzentrationen vorhanden sind. Das grösste Problem entsteht durch molekulare Ionen (¹²CH₂, ¹³CH), die praktisch die gleiche Masse wie die ¹⁴C-Atome haben, jedoch in 10-milliardenfachem Überschuss im Ionenstrahl vorkommen. Damit sie sich herausfiltern lassen, entfernt man durch Stossprozesse Elektronen aus der Hülle der molekularen Ionen. Sind mehr als drei Elektronen entfernt, brechen die Ionen auseinander und die Fragmente können leicht abgetrennt werden. Die Anre-

gung dieser Ladungszustände ist aber erst bei relativ hohen Energien (2 bis 3 MeV) effizient, sodass grosse Beschleunigeranlagen benötigt werden.

Molekulare Bindungen aufbrechen

Der Aufbruch molekularer Bindungen ist aber auch in tiefen Ladungszuständen möglich, die stabile Bindungszustände aufweisen – z.B. bei Ionen, die ein oder zwei Elektronen weniger als das neutrale Molekül besitzen. Hier nutzt man einen Mechanismus, der bei Vielfachstößen von molekularen Ionen und Gasatomen auftritt und der zu einer exponentiellen Abnahme der Intensität der Moleküle führt. Basierend auf diesem Prinzip wurde eine Datierungsanlage aufgebaut, mit der Präzisionsaltersbestimmungen durchgeführt werden können. Die Entwicklung erfolgte in Zusammenarbeit mit einem industriellen Partner (NEC Wisconsin, USA), der baugleiche Anlagen nun kommerziell vertreibt.

Das Labor für Ionenstrahlphysik ist noch einen Schritt weiter gegangen. Es wurde eine Beschleunigungsstufe aufgebaut, bei der sich der Gasumladekanal auf einer Hochspannungsplattform befindet, die durch ein Vakuum elektrisch isoliert ist. Dieses Konzept ermöglicht eine sehr kompakte Bauweise mit einer

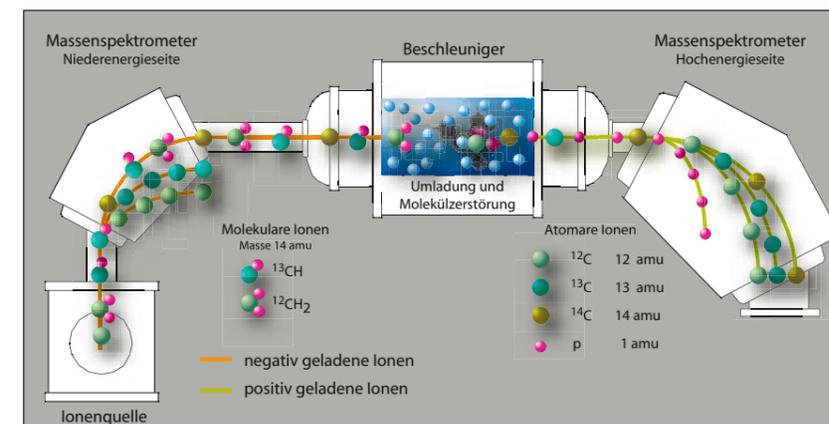
¹⁴C- oder Radiokarbon-Methode: basiert auf dem radioaktiven Zerfall des Kohlenstoffisotops ¹⁴C und ermöglicht Altersbestimmungen für Zeiträume von 300 bis zu 40'000 Jahren.

Energieeinheit: 1 Elektronenvolt (eV) ist jene Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Potenzialdifferenz von 1 Volt durchquert (k: kilo = tausendfach, M: Mega = millionenfach).



Die neu entwickelte Beschleunigungsstufe (Bildmitte) der AMS-Anlage ermöglicht Radiokarbon-Datierungen auf kleinstem Raum.

Gesamtlänge von nur etwa einem Meter. Nach erfolgreichem Test der Anlage konnten bereits erste Messungen durchgeführt werden. Zurzeit wird das System zu einer kompletten Datierungsanlage erweitert, die völlig neue Möglichkeiten der Radiokarbon-Datierung eröffnet.



Beschleuniger-Massenspektrometer: Störende molekulare Ionen werden in einem Gaskanal zerstört. Der Kanal ist Teil des Beschleunigers, der Ionen auf hohe Energien bringt. Massenspektrometer dienen der Aufspaltung und damit Analyse verschiedener Teilchensorten.



Die Unbeirrbare

Gudrun Goitein

Mit unermüdlicher Energie hat Gudrun Goitein der Protonentherapie für tief liegende Tumoren am PSI zum Durchbruch verholfen. Jetzt wird die neue Technik fit gemacht für die Spitäler.

Gudrun Goitein



Der 1. Januar 2002 markiert einen Meilenstein in der Abteilung für Protonentherapie am PSI: Seit diesem Datum gilt die neue Methode für die Behandlung tief liegender Tumoren als Pflichtleistung der Krankenkassen. Urheberin des Antrags ist Gudrun Goitein. «Für mich

ders strahlenempfindlichen Bereichen des Körpers zu behandeln.

An diesem Projekt war Gudrun Goitein von Anfang an beteiligt. Die in Köln, Lübeck und Zürich ausgebildete Radio-Onkologin stiess 1989 zum Institut, nachdem sie vorher schon einmal Gast war. Sie habe in

Neue Technik dank Teamwork

war diese Anerkennung auch ein ganz persönliches Ziel», sagt die 53-Jährige stolz, «denn nun können wir weiterarbeiten und spitaltaugliche Modelle entwickeln; der Prototyp, den wir für unsere tägliche Praxis verwenden, ist für die Kliniken noch zu kompliziert.»

Die Tumorbehandlung mit Protonenstrahlen ist am PSI schon lange etabliert. Auf diese Weise werden seit 1984 im OPTIS-Programm erfolgreich Augentumoren behandelt. Protonen sind für die Strahlentherapie im Vergleich zu den herkömmlichen Röntgen- bzw. Gammastrahlen besonders geeignet, weil die Strahlendosis sehr präzise an die Form des Tumors angepasst und das gesunde Gewebe noch besser geschont werden kann. Gestützt auf diese Erkenntnisse wurde am PSI eine neue Anlage entwickelt, um tief liegende Tumoren beispielsweise in den Hirnhäuten oder anderen sensiblen oder beson-

all diesen Jahren unendlich viel gelernt, sagt sie. «Das ist mein allergrösster Gewinn.»

Gudrun Goitein verweist damit auf die am PSI gelebte Interdisziplinarität, denn diese habe die neue Technik überhaupt erst ermöglicht. «Alle grundlegenden Fortschritte in der Strahlentherapie kommen eigentlich aus der Physik», betont sie. «Wir Ärzte und Ärztinnen liefern Ideen, wie eine Methode am Schluss beim Patienten angewendet werden könnte. Aber das Projekt in aller Konsequenz zu entwerfen, das Desgin dafür zu entwickeln, das können nur die Physiker». Das wird Aussenstehenden spätestens dann klar, wenn sie die über 100 Tonnen schwere Protonen-Gantry, von der aus die gebündelten Protonenstrahlen zum Patienten und auf den Tumor gerichtet werden, erst einmal mit eigenen Augen sehen. Der Physiker Eros Pedroni war es, der diesem grossen Wurf am PSI zur

Entstehung verhalf. Ohne ihn, sagt Gudrun Goitein, gäbe es die neue Technik nicht.

Ihre eigene Aufgabe besteht hauptsächlich darin, noch mehr Patienten-Erfahrungen mit der Anlage zu sammeln und das Projekt für die Anwendung in den Kliniken weiterzutreiben. Doch damit ist ihr Tätigkeitsfeld noch lange nicht abgedeckt. «Budgetarbeit, Administration, Kontakte nach aussen – zur normalen Feierabendzeit komme ich hier selten raus», sagt sie lachend. Grosse Sorgfalt legt sie überdies auf die Führung ihrer Gruppe, in der sich «alle sehr viel abverlangen».

Doch Gudrun Goitein, mit ihrer souveränen, herzlichen Art, scheint eine geborene Führungspersönlichkeit zu sein. Woher das kommt? Dazu erzählt sie eine kleine Geschichte: Mit Anfang 20, als das Medizinstudium noch vor ihr lag, hatte sie während ein paar Jahren in Köln eine leitende Funktion in einer Apotheke. Sie sei damals sehr jung gewesen für eine solche Aufgabe. «Aber da war ich plötzlich Chef, und ich habe meine Lehren daraus gezogen. Das prägt.»

Irène Dietschi

Noch höhere Qualität und Zuverlässigkeit

Spot-Scanning-Technik: Mit dem am PSI entwickelten Verfahren lässt sich die Strahlendosis mit grosser Präzision dreidimensional an die Form des Tumors anpassen.



Der revidierte Patiententisch mit Liege, den drei Drehachsen (α , β , β -exzentrisch) und dem neuen Kollisionsschutz.

Mit einem neuen Patiententisch lässt sich die Bestrahlung mit Protonen an der Gantry wesentlich verbessern.

Die Protonentherapie-Anlage des PSI für tief liegende Tumoren (Gantry) ist seit 1997 in Betrieb. Damit wurden bisher 129 Patienten behandelt, und dies mit viel versprechenden Resultaten. Es ist die einzige Protonen-Gantry der Welt, bei der eine dynamische Applikation eingesetzt wird, das so genannte Spot-Scanning. Zunehmend anerkennt die Fachwelt diese Technik als die konkurrenzfähigste Methode im Vergleich mit den neuesten Entwicklungen in der konventionellen Strahlentherapie.

Auf Grund ihrer hohen Attraktivität und des positiven Echos innerhalb und ausserhalb des PSI wird die Therapieanlage zurzeit im Rahmen des Projekts PROSCAN erweitert (siehe auch Seiten 57 und 61). Gantry 1 wurde zwischen 1992

und 1994 realisiert, um die Machbarkeit der Spot-Scanning-Technik zu demonstrieren, und dient auch in Zukunft als «Arbeitspferd» für das Protonentherapie-Programm des PSI. Die Erfahrungen mit dem System verlangten jedoch nach technischen Anpassungen. Im Laufe des Betriebsunterbruchs (Shutdown) 2001/2002 wurde deshalb der Patiententisch an der Gantry 1 modifiziert (siehe Bild).

Bestrahlungen in jeder Körperregion

Die Verbesserungen des mechanischen Systems erlauben es, den Patienten aus mehreren Einstrahlrichtungen in der gleichen Session – ohne Verlassen oder Abkoppeln der Liege – nacheinander zu bestrahlen. Das neue System erweitert den Drehbereich des Patiententisches in der horizontalen Ebene, ohne dass metallische Teile im Strahlweg liegen oder Röntgenaufnahmen für die Posi-

tionierung verhindert werden. Möglich macht es zudem Bestrahlungen in jeder Körperregion, wobei der Tumor stets im Isozentrum (Mittelpunkt) der Gantry zentriert bleibt. Die Erfahrungen mit dem neuen System in der Strahlperiode 2002 sind sehr positiv verlaufen.

In einem weiteren Schritt bauen wir einen neuen Reichweitenmodulator ein und nehmen Verbesserungen an Software und Hardware vor, um die Steuerung des Strahls weiter zu optimieren. Damit werden die Komponenten der Gantry 1 ebenso hoch zuverlässig wie die neuen Teile von PROSCAN. Diese technischen Weiterentwicklungen ermöglichen auch neue Behandlungen und verbessern die Qualität der Bestrahlungen weiter. Davon profitieren in erster Linie unsere Patientinnen und Patienten.

Entartete Proteine wie bei Alzheimer

Im Bereich Biowissenschaften des PSI wurde ein Modellsystem entwickelt, mit dem sich wichtige molekulare Erkenntnisse über schwere Nervenkrankheiten gewinnen lassen.

Amyloidosen umfassen einige der am meisten gefürchteten und mit hohen Kosten verbundenen Krankheiten der westlichen Welt. Ihre Ursache sind Protein-Ablagerungen, die durch Missfaltung bestimmter Proteine zustande kommen. Bekannt sind mehr als 20 menschliche Amyloidosen (u.a. Alzheimer, Parkinson, Creutzfeldt-Jakob), die durch die Bildung von so genannten Amyloid-Fibrillen ausgelöst werden.

Obwohl auf diesem Forschungsgebiet in den letzten Jahren grosse Fortschritte zu verzeichnen sind, fehlen immer noch detaillierte Einblicke in die molekularen Mechanismen, die normalerweise gutartige Proteine dazu veranlassen, entartete und toxische Amyloid-Fibrillen (Nervenfasern) zu bilden. Solche Ergebnisse sind unerlässlich, um gezielt in den Krankheitsverlauf eingreifen zu können.

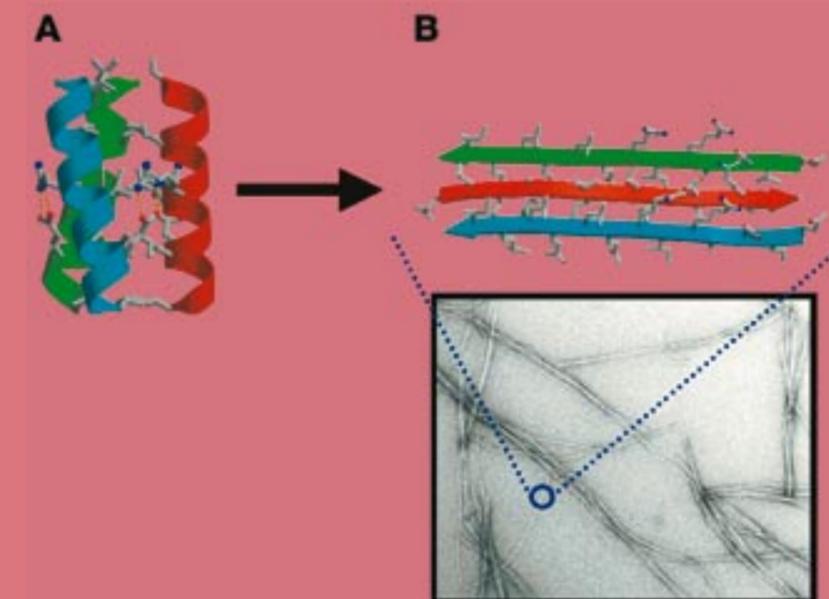
Effekte wie in pathogenen Zuständen

Um diese Mechanismen aufzuklären, hat ein Forschungsteam am PSI ein vereinfachtes Peptidmodellsystem entwickelt. Es ist in der Lage, ein Mini-protein zu bilden (Figur A), das sich in Amyloid-Fibrillen (Figur B) umwandeln lässt. Anhand einer Mutationsstudie wurden Effekte nachgebildet, die in krankheits-erregenden Zuständen beschrieben sind. Insbesondere gelang es, die Umwandlungszeit von der gutartigen Form zur entarteten Amyloid-Fibrillen-Struktur anhand kleiner Peptidsequenzänderungen gezielt zu kontrollieren.

Strukturelle und biophysikalische Untersuchungen zeigten, dass spezifische und sequenzabhängige intermolekulare Wechselwirkungen zwischen den Polypeptidketten für die Amyloid-Fibrillenbildung verantwortlich sind. Diese Erkenntnisse tragen zum Verständnis von mutationsbedingten Amyloidosen bei.

Amyloidosen stellen eine pathogenetisch und biochemisch-heterogene Gruppe von Krankheiten dar, die durch ausserzelluläre Ablagerungen von Proteinen charakterisiert sind und häufig tödlich verlaufen. Dazu gehören u.a. die Alzheimer-, Parkinson- und Creutzfeldt-Jakob-Krankheit.

Peptid: kleines Eiweissmolekül, das eine einfache Interpretation der Daten ermöglicht. Im PSI-Peptidmodell besteht es aus einer Sequenz von 17 aufeinander folgenden Aminosäuren.



Gutartig (A): Röntgenstruktur des entwickelten Peptidmodellsystems in der «gutartigen» Form (Figur A). Drei Helices (rot, grün, türkis) sind zu einer so genannten alpha-helikalen Coiled-Coil-Struktur gefaltet. Bei 4°C bleibt das Mini-protein in dieser Form über mehrere Tage unverändert löslich. Dimensionen: 2,3x2,7 Nanometer (Millionstelmillimeter).

Entartet (B): Elektronenmikroskopisches Bild des Peptidsystems in der entarteten Amyloid-Fibrillen-Form und experimentell unterstütztes molekulares Modell. Bei 37°C verwandelt sich das lösliche Mini-protein innerhalb von Stunden in eine beta-Faltblatt basierende, unlösliche Fibrillenstruktur um. Diese Amyloid-Fibrillen sind denjenigen von Alzheimer verblüffend ähnlich. Dimensionen der Fibrille: ca. 10 Nanometer (nm) dick, länger als 1 Mikrometer.

Kupfernuklide vernichten den Krebs

Ligand: Atom oder Molekül, das in einer chemischen Verbindung höherer Ordnung dem zentralen Atom angelagert ist.

systemisch: den Gesamtorganismus betreffend.

Becquerel (Bq): Einheit der (Radio-)Aktivität; 1 Becquerel bedeutet, dass im statistischen Mittel 1 Atomkern pro Sekunde zerfällt (M: Mega = millionenfach, G: Giga = billionenfach).

Die Anwendung von Cu-markierten Antikörpern zur Diagnose und Therapie von Tumoren lässt sich schneller optimieren – dank der hoch auflösenden Positronen-Emissions-Tomografie (PET).

Die Kupfernuklide ⁶⁷Cu und ⁶⁴Cu werden am PSI-Ringzyklotron hergestellt und im Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaft (ZRW) eingesetzt. Gebunden an tumorspezifische Antikörper können sie Tumoren abbilden (⁶⁷Cu, ⁶⁴Cu) und zerstören (⁶⁷Cu). Dazu werden tumorspezifische Antikörper mit geeigneten Kupferliganden gekoppelt und mit den Kupfernukliden markiert. Solche Antikörper-Konjugate können für die systemische oder lokale Radioimmundiagnose und -therapie angewandt werden.

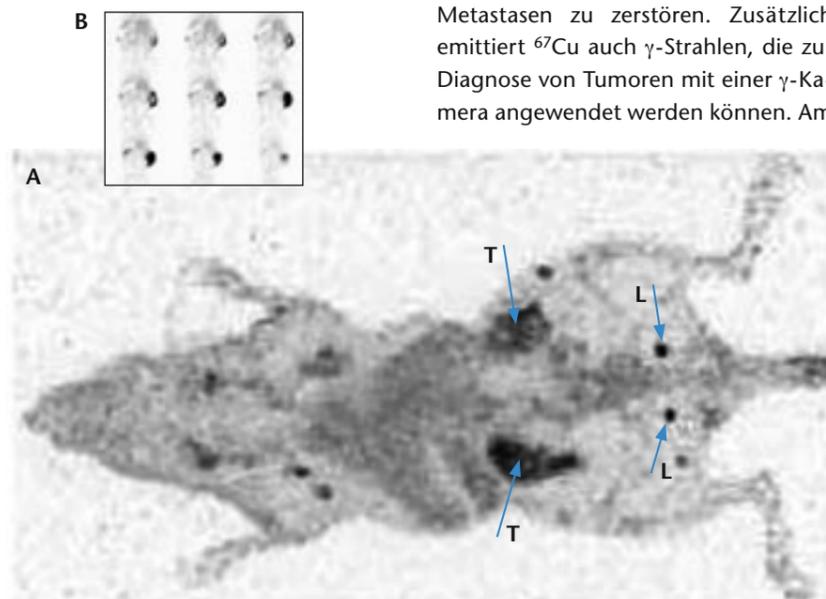
⁶⁷Cu ist ein β-Strahler mit einer geringen Reichweite von bis zu 1 mm, und damit hervorragend geeignet, kleine Metastasen zu zerstören. Zusätzlich emittiert ⁶⁷Cu auch γ-Strahlen, die zur Diagnose von Tumoren mit einer γ-Kamera angewandt werden können. Am

ZRW wurde in Zusammenarbeit mit dem Unispital Nottingham (UK) eine diagnostische Studie mit einem ⁶⁷Cu-markierten, gegen Blasenkrebs gerichteten Antikörper C595 (70 MBq Dosis) an 12 Patienten erfolgreich abgeschlossen. Gegenwärtig läuft eine therapeutische Studie mit einer Dosiserhöhung bis zu 1 GBq von ⁶⁷Cu-C595.

Verteilung der Radioaktivität

Seit der Verfügbarkeit des Kleintier-PET-Scanners am PSI lässt sich der Positronenstrahler ⁶⁴Cu für eine hoch auflösende Tumorabbildung einsetzen. Im Vergleich zur Abbildung mit einer γ-Kamera erlaubt die PET-Methode eine wesentlich bessere Auflösung und eine quantitative Auswertung der Daten. Die PET-Aufnahme einer Maus gibt wichtige Informationen über die genaue Verteilung der Radioaktivität in den Tumoren und in den übrigen Organen. So erfasst die PET-Methode auch Radioaktivität, die sich in den Lymphknoten anreichert (Abbildung A). Solch kleinste Strukturen lassen sich mit der γ-Kamera nicht erfassen. Die Antikörper reichern sich am stärksten, wie erwünscht, in den beiden Tumoren an.

Abbildung B zeigt eine Schnittserie des PET-Tomografen durch einen Nierentumor. Man erkennt, dass die Radioaktivität sich im äusseren Rand des Tumors konzentriert und diese ungleichmässige Verteilung möglicherweise den Therapieeffekt beeinflusst. Wir können nun den Optimierungsprozess unserer Antikörper-Konjugate mit dem ⁶⁴Cu-PET-Imaging verfolgen und Aussagen darüber machen, wie sich die Konjugate in Tumor und normalen Organen genau verteilen. Solche Aufschlüsse waren bisher nicht möglich.



PET-Tumorbilder nach Applikation von ⁶⁴Cu-markierten Antikörpern.

Abbildung A: Schnitt durch eine Maus mit zwei menschlichen Nierentumoren (T). Radioaktivität reichert sich am stärksten in den Tumoren an. L: Lymphknoten, welche die radioaktiven Abbauprodukte des Antikörpers speichern.

Abbildung B: Coronalanschnitte durch einen 0,9 cm grossen Nierentumor zeigen die ungleichmässige Verteilung der Radioaktivität im Tumor, was den Therapieverlauf beeinflusst.

Transportmittel für heilende Strahler

Radionuklid: Typ von Atomkernen (Nuklide), die Strahlung aussenden und sich dabei in einen andern Typ verwandeln.

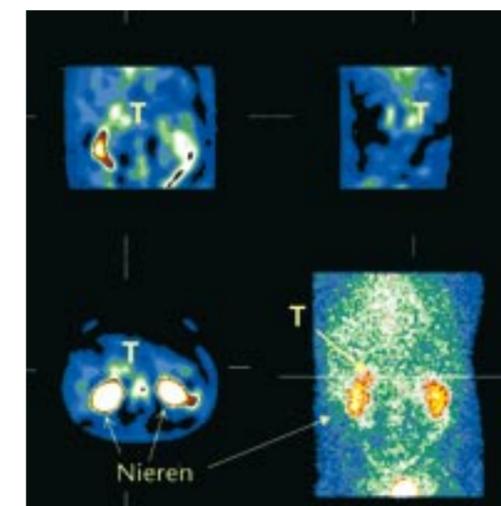
Neurotensin-Rezeptor: Proteinmolekül auf Zelloberfläche mit einer Struktur, die Neurotensin bindet.

Eine erste Studie von Patienten mit Pankreastumoren, die mit Technetium-markiertem Neurotensin behandelt wurden, zeigt ermutigende Resultate.

Seit rund vier Jahren arbeitet eine Forschungsgruppe am PSI an der Entwicklung von Neurotensin für die Diagnose und Therapie von Tumoren des Pankreas (Bauchspeicheldrüse). Nachdem die präklinischen Arbeiten mit Zellkulturen und Tieren gute Resultate gezeigt hatten, wurden erste Studien mit Patienten durchgeführt. Diese Studien bestätigen unsere Hypothese über das Verhalten von Neurotensin, erlauben aber noch keine definitive Beurteilung des Wertes der Methode. Die Zahl der Patienten ist viel zu klein.

Bei vielen Tumoren konnten in den letzten Jahren die Heilungschancen deutlich verbessert werden, insbesondere wenn noch keine Metastasen vorhanden waren. Immer noch schlecht sind die Aussichten bei Pankreastumoren. Weil jedoch bei etwa 70 Prozent der Pankreastumoren überdurchschnittlich viele Neurotensin-Rezeptoren vorhanden sind, sollte eigentlich die Chance auf Heilung steigen, wenn mit Hilfe von Neurotensin Radionuklide in diese Tumoren transportiert werden. Als erstes mussten wir also zeigen, dass diese Hypothese stimmt.

Neurotensin (NT) ist ein Peptid (kleines Eiweissmolekül), das aus 13 Aminosäuren besteht, wobei die Aminosäuren 8 bis 13 für die Bindung an den Rezeptor wichtig sind. Weil Peptide im Allgemeinen nach Injektion in die Blutbahn sehr schnell abgebaut werden, führten wir Änderungen ein. Damit wurde eine hohe Stabilität erreicht, ohne die Bindung an die Rezeptoren zu beeinträchtigen. Zudem wurde ein Ligand eingebaut, der Metall-Ionen zu binden



Tumor (T) im Pankreas: SPET-Bilder (SPET = Single-Photon-Emissions-Tomografie) eines Patienten. Die Verbindung, bestehend aus einem Neurotensin-Analogen und ^{99m}Tc-Tricarbonsyl, wird über die Nieren ausgeschieden und zeigt deshalb eine hohe Anreicherung in diesem Organ.

vermag und so die Markierung mit ^{99m}Tc-Tricarbonsyl (Technetiumverbindung) ermöglichte.

Markierungsmethode funktioniert

In einer Reihe von 16 Verbindungen (NT-Analoga) untersuchten wir die pharmakologischen Eigenschaften in Zellkulturen und in Mäusen. Eine dieser Verbindungen hatte derart gute Eigenschaften, dass wir sie beim Bundesamt für Gesundheit anmelden konnten (eine zweite ist in Vorbereitung) und klinische Versuche am Centre Hospitalier Universitaire Vaudois (CHUV) begonnen wurden. Nach der Abbildung der Aktivitätsverteilung (Szintigramm) in den Patienten erfolgte der chirurgische Eingriff und danach wurden die Tumoren untersucht. Dabei zeigte es sich, dass im Szintigramm nicht sichtbare Tu-

moren keine (oder nur sehr wenige) Rezeptoren aufwiesen, während Tumoren mit einem Übermass an Rezeptoren auch im SPET-Bild erschienen.

Damit hatten wir nicht nur den Nachweis, dass unsere Idee grundsätzlich richtig war, sondern auch die Bestätigung, dass die Markierungsmethode mit ^{99m}Tc-Tricarbonsyl, die schon vorher am PSI entwickelt und patentiert worden war, in der medizinischen Praxis funktioniert. Weitere Studien mit Patienten sind notwendig, um auch den medizinischen Wert der Methode beurteilen zu können. Parallel dazu arbeiten wir an der Markierung mit Rhenium-188, einem Radionuklid, das β-Strahlen aussendet. Damit soll die Radionuklid-Therapie von Pankreastumoren möglich werden.



Auf grosser Skala

Olivier Auban

Die Arbeit von Olivier Auban in der PANDA-Versuchsanlage ist nicht nur physikalischer, sondern auch physischer Natur: Um neue Messinstrumente zu erproben, legt er Hunderte von Stufen zurück.

Olivier Auban

Wenn Olivier Auban (30) einen Tag lang in der PANDA-Anlage gearbeitet hat, dann spürt ers abends in den Knien. 25 Meter hoch ist die Konstruktion im Innern des weissen Test-Gebäudes, versehen mit unzähligen Treppen und Brücken, welche die einzelnen Komponenten für die Versuchingenieure zugänglich machen. Olivier Auban ist auf Messinstrumente spezialisiert. Wenn er ein neues Gerät installiert, verbringt er den Tag quasi mit Treppensteigen, Hunderte von Höhenmetern bringt er auf diese Weise hinter sich. Etwa die Hälfte seiner Arbeitszeit ist er im Büro mit Auswertungen beschäftigt. «Eh bien, hier kann ich zum Glück sitzen», sagt der Franzose lachend.

PANDA existiert am Paul Scherrer Institut seit bald zehn Jahren und ist eine weltweit renommierte Versuchsanlage, in der die «passive» Kühlung von Leichtwasserreaktoren erprobt wird. Bei Kernkraftwerken wird herkömmlicherweise die so

genannte Nachwärme, die nach der Abschaltung des Reaktors durch den Kernzerfall entsteht, über ein «aktives» Kühlsystem ausserhalb des Reaktors abgeführt, beispielsweise über einen Kühlturm. PANDA simuliert Prozesse, in denen die

Nachwärme ohne aktive Systeme abgeführt wird, nämlich durch intern gespeicherte/freigesetzte Energie, also «passiv». Das ist nicht nur sicherer, sondern auch kostengünstiger.

Die Arbeit in seiner fünfköpfigen, international zusammengesetzten Gruppe mache ihm grossen Spass, sagt Olivier Auban, der seit März 2001 am PSI ist. Es ist für den jungen Physiker die erste «ernsthafte» Stelle. Die brachte für ihn allerdings auch eine Umstellung mit sich: «Vom Studium her war ich Experimente im kleinen Rahmen gewohnt, ich konnte einen Versuch 25, 30 Mal wiederholen. In der PANDA-Anlage hingegen passiert alles auf einer immens grossen Skala. Ein Experiment wird während Monaten minutiös vorbereitet, alles muss stimmen und ineinander pas-

sen.» Zudem habe der Einzelne eine hohe Gruppenverantwortung: Wenn einer versagt, trifft das ganze Team. «Die Kehrseite davon ist, dass wir auch den Erfolg in der Gruppe haben und uns gegenseitig motivieren. Das ist sehr schön.»

Alles muss stimmen und ineinander passen

Olivier Auban stammt aus Toulouse, wo er auch sein Physikstudium absolviert hat. Seine Doktorarbeit führte ihn nach Nancy, ein erster Job nach Paris. Doch das hektische Leben in der Metropole gefiel ihm überhaupt nicht. «Als ich zufällig das Inserat von der Stelle hier am PSI sah, zögerte ich nicht, mich zu bewerben.» Obwohl zehn Autostunden von zu Hause entfernt, fühlt sich Olivier Auban in Villigen sehr wohl. Vor allem, weil die Schweizer Alpen so nahe sind. Dort fährt er an den Wochenenden oft hin, um Ski zu fahren oder Berge zu besteigen. Keine Treppen, sondern richtige Höhenmeter.

Irène Dietschi



Ermüdung frühzeitig im Visier

Austenit: bestimmter Mischkristall im System Eisen-Kohlenstoff (nach dem englischen Forscher Sir William Chandler Roberts-Austen).

Martensit: beim Härten von Stahl entstehendes Gefüge von Eisen und Kohlenstoff (nach dem deutschen Ingenieur Adolf Martens).

Mit zerstörungsfreien Methoden lässt sich Materialermüdung bereits in der frühen Entstehungsphase erkennen. Thermomechanische Ermüdung beeinflusst die Lebensdauer der betroffenen Komponenten in einem KKW.

In der Gruppe Bauteilsicherheit des PSI wurden Veränderungen der mikrostrukturellen und magnetischen Eigenschaften von rostfreien Stählen untersucht, die unter bestimmten Kraftwerksbedingungen an Rohrleitungen und Behälterstützen auftreten können. Langfristig sollen die Untersuchungen zu einer Lebensdauer-Überwachung für Ermüdung an Rohrleitungen führen.

Bisher gibt es noch keine Verfahren, die mittels zerstörungsfreier Methoden den Materialzustand von Bauteilen während des industriellen Einsatzes bewerten können. Die zerstörungsfreie Materialprüfung konzentriert sich aufs Auffinden von makroskopischen Materialfehlern, vor allem von Rissen. Doch bevor technische Risse entstehen, kommt es zu Veränderungen in der Mikrostruktur von Stählen, die unter bestimmten Voraussetzungen eine Früherkennung von Materialschäden ermöglichen. Die Werkstoffdiagnostik untersucht deshalb

Zusammenhänge von mikrostrukturellen, mechanischen und physikalischen Eigenschaften.

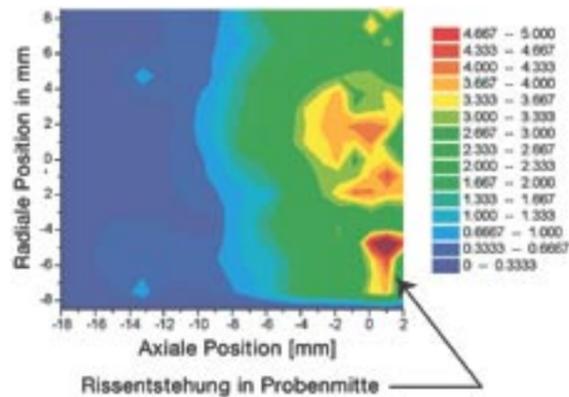
Martensit zeigt Ermüdung an

Für die untersuchten Material- und Versuchsbedingungen liess sich zeigen, dass man den Effekt der deformationsinduzierten Martensitbildung als Ermüdungsindikator verwenden kann. Unter mechanischer Belastung kommt es in diesen Stählen zu einer teilweisen Umwandlung der Struktur des Austenits in Martensit. Der Anteil des umgewandelten Martensits wird als Mass der fortschreitenden Ermüdungsschädigung genutzt.

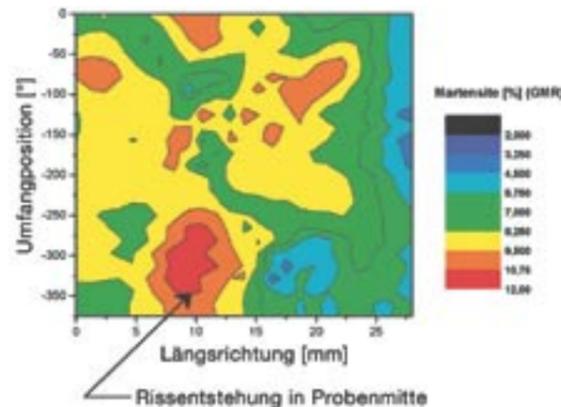
Mit der Neutronendiffraktometrie an der SINQ des PSI konnte eine Methode gefunden werden, die eine genaue Bestimmung des Martensitgehalts ermöglichte. Durch Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie (Synchrotronlicht) wurde die Martensitverteilung an der Oberfläche der Werkstoffproben bestimmt. Die Untersuchungen ergaben, dass unter gewissen Einschränkungen eine Ermüdungsfrüherkennung mittels zerstörungsfreier magnetischer Prüfmethoden möglich ist.



Ein hoch präziser Sensor misst die Dehnungen bei einer Ermüdungsprobe. Damit verbunden ist die Bildung von Martensit, einem Ermüdungsindikator.



Röntgendiffraktometrie (Synchrotronlicht): Martensitverteilung im Längsschnitt einer Ermüdungsprobe bei Rissentstehung. Die rot markierten Gebiete dokumentieren Bereiche mit hoher Martensitkonzentration, wobei der Rissbereich am meisten Martensit enthält.



Hightech-Magnetmesstechnik: Eine Art magnetische Karte an der Oberfläche einer Ermüdungsprobe bei Entstehung eines Risses. Dargestellt sind Wirbelstrom-Impedanz-Messungen (GMR-Sensor) an der Mantelfläche einer Ermüdungsprobe. Die höchste Martensitkonzentration wurde auch hier im Bereich des technischen Anrisses gefunden.

Spaltprodukte als Aerosole zurückhalten

In einem internationalen Forschungsprojekt am PSI sollen neue Erkenntnisse zur Unfallbeherrschung in einem Druckwasserreaktor und damit eine erhöhte Sicherheit gewonnen werden.

Trotz erheblicher Verbesserungen in der Konstruktion, Werkstoffauswahl, Herstellung und Betriebsweise von Dampferzeugern in Druckwasserreaktoren (DWR) treten weltweit immer wieder Störungen auf – z.B. infolge eines Lecks oder sogar Bruchs eines von den ca. 3000 Heizrohren im Dampferzeuger (SGTR: Steam Generator Tube Rupture). SGTR-Abläufen wird in Sicherheitsanalysen seit jeher besondere Beachtung geschenkt.

Als fatale Komplikation beziehen DWR-Risikostudien den Fall ein, dass ein SGTR in Kombination mit andern Versagen auftreten könnte. Angenommen werden ein oder mehrere SGTR mit gleichzeitig auftretendem Auslegungsstörfall für Kühlmittelverlust oder gar mit gleichzeitigem schwerem Unfall, der zum Schmelzen des Reaktorkerns führen könnte. Einerseits ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Kombination aus schweren Unfällen und SGTR verschwindend klein, andererseits muss man aber die möglichen Auswirkungen mangels Kenntnissen über den Ablauf konservativ als sehr erheblich einschätzen. Es ist durchaus denkbar, dass ein Strömungspfad entsteht, über den radioaktive Spaltprodukte direkt in die Umgebung des KKW gelangen könnten. In der Schweiz sind die Anlagen von Beznau und Gösgen mit DWR ausgerüstet.

Weltweites Interesse an Projekt

Zur Reduzierung der Unsicherheiten im Falle eines SGTR hat das PSI das Forschungsprojekt ARTIST (AeRosol Trapping In a Steam GeneraTor) initiiert. Ziel



Realität und Modell: Ein realer Dampferzeuger (Bilder links) eines Druckwasserreaktors wird in ARTIST mit einem Rohrbündel (270 Heizrohre) und je einem prototypischen Tropfenabscheider- und Dampftrockner-Modul simuliert (Illustrationen rechts).

der experimentellen Untersuchungen ist die Bereitstellung von Messdaten und die physikalische Interpretation zur Rückhaltung von Spaltprodukten in Form von Aerosolpartikeln und Tropfen in den verschiedenen Komponenten eines Dampferzeugers (Filterwirkung) unter ähnlichen Randbedingungen wie in einem KKW.

ARTIST hat weltweit sehr grosses Interesse bei Forschungsinstitutionen, Kraftwerksbetreibern und Aufsichtsbehörden geweckt. In den vergangenen zwei Jahren vermochte das PSI ein Konsortium zu etablieren, an dem sich bisher 11 Or-

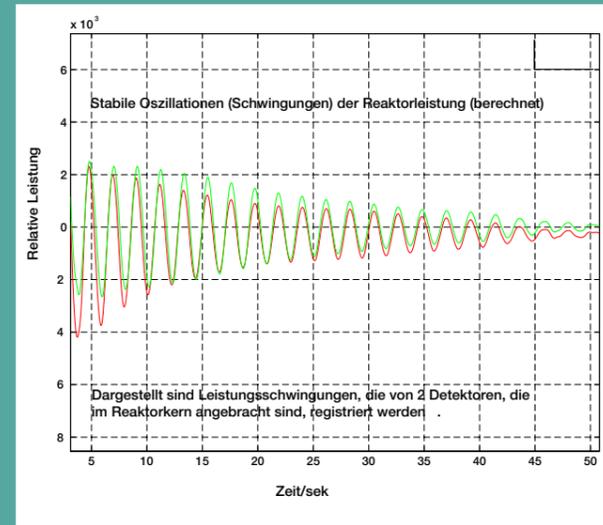
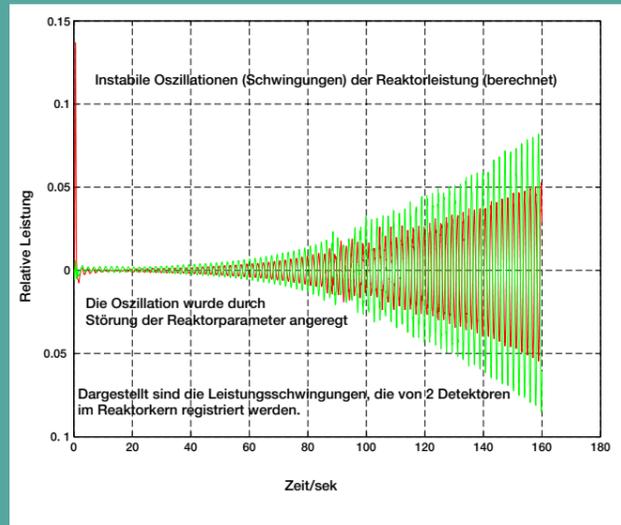
ganisationen aus Europa, Japan und den USA als Partner beteiligen. Angenommene Störfälle will man realitätsnah modellieren und die Ergebnisse zur Entwicklung physikalischer Modelle und zur Validierung von Rechen-codes für Sicherheitsanalysen verwenden.

Schliesslich sollen die Erkenntnisse zur Entwicklung, Überprüfung und zu Verbesserungen von Notfallmassnahmen und Richtlinien zur Unfallbeherrschung bei SGTR-Ereignissen führen. ARTIST startet im Januar 2003 und dauert bis Ende 2007.

Unerwünscht: Wenn die Leistung schwingt

Simulation von Leistungsozillationen: In der linken Grafik befindet sich der Reaktor des KKW in einem instabilen, rechts in einem stabilen Arbeitspunkt. Die Leistungsschwingungen wurden durch eine Störung

der Reaktorleistung angeregt und von Neutronenflussdetektoren registriert, die im Reaktorkern angebracht sind (und vom Rechenprogramm simuliert werden).



Mit Modellen und Experimenten wird das Stabilitätsverhalten von Siedewasserreaktoren untersucht.

Siedewasserreaktoren (SWR) sind vor allem wegen der inneren Rückkopplungsprozesse nichtlineare dynamische Systeme. In der Schweiz sind die Kernkraftwerke Mühleberg und Leibstadt damit ausgerüstet. Die Lösungsvielfalt der Gleichungen, welche die Physik solcher Systeme beschreiben, enthält sowohl stabile als auch instabile oszillatorische Lösungen, die sich ebenfalls experimentell nachweisen lassen. Für den sicheren und wirtschaftlichen Betrieb von Siedewasserreaktoren ist deshalb eine möglichst genaue Kenntnis der Stabilitätsgrenzen notwendig.

SWR sind Reaktoren mit Leichtwasserkühlung, wobei das Sieden des Kühlmittels im Reaktor zugelassen wird. Da das Wasser auch gleichzeitig als Neutronenmoderator wirkt, der in thermischen Reaktoren die bei der Kernspaltung entstehenden, energiereichen Neutronen

auf thermische Energien bremst, hat die Dampfbildung einen wesentlichen Einfluss auf das Multiplikationsverhalten der Spaltzone und somit auf das Zeitverhalten der Reaktorleistung. Folglich ist der dominante Rückkopplungsparameter, der das Stabilitätsverhalten des dynamischen Systems SWR bestimmt, eine Funktion des Dampfgehalts.

Experiment und Rechnung

Instabile Leistungsozillationen sind aus sicherheits- und betriebstechnischer Sicht zu vermeiden. Dazu muss das Gebiet in der Arbeitscharakteristik der SWR, in dem diese Oszillationen auftreten können, möglichst genau bekannt sein. Der Instabilitätsbereich wird derzeit experimentell und rechnerisch durch die Analyse des Stabilitätsverhaltens einiger Arbeitspunkte auf dem angenommenen Rand des Gebiets ermittelt und dann konservativ als ein Ausschlussgebiet in der Arbeitscharakteristik festgelegt.

Experimente und Rechnungen mit Systemcodes, mit denen man das Zeitverhalten dieser Anlagen simulieren kann, werden wegen des hohen Aufwands nur für einige Arbeitspunkte durchgeführt. Um genauere Vorstellungen vom mathematischen Verlauf der Stabilitätsgrenzen zu erhalten und um die physikalischen Prozesse, die das Stabilitätsverhalten bestimmen, genauer zu verstehen, werden vereinfachte SWR-Modelle entwickelt, in denen die physikalischen Vorgänge im Reaktor in einem angemessenen Detaillierungsumfang beschrieben werden. Ein derartiges Modell ist im Rahmen einer Doktorarbeit am PSI entwickelt worden. Das Stabilitätsverhalten dieses Modells lässt sich mit speziellen Methoden der nichtlinearen Dynamik mit vergleichsweise geringem Aufwand untersuchen.

Aktuell codiertes Chemiewissen

Auf Grund einer umfassenden Sammlung chemischer Zahlenwerte lässt sich die geringe Löslichkeit von Stoffen in Endlagern voraussagen – immer präziser, weil PSI-Forscher die Daten stets verbessern.

Radioaktive Abfälle aus der Stromproduktion, aus Medizin, Industrie und Forschung können dem Menschen bei unsachgemäßer Handhabung durch ihre Strahlung Schaden zufügen. Heutige Konzepte sehen deshalb vor, solche Stoffe durch geologische Tiefenlagerung sehr lange vom Lebensraum des Menschen fernzuhalten. In der Zeitspanne des Einschusses zerfallen die radioaktiven Elemente. Zahlreiche natürliche und technische Barrieren und Prozesse tragen dazu bei, dass die eingelagerten Abfallstoffe in der Tiefe zurückgehalten werden.

Einer dieser Rückhalteprozesse basiert auf der äusserst geringen Auflösung der chemischen Elemente in den Porenwässern der Abfallbehälter und des umge-

benden Gesteins. Wenn sich nur sehr kleine Mengen der Abfälle auflösen, können auch nur minimste Mengen durch Grundwässer in den Lebensraum des Menschen zurückgelangen.

Allgemein gültige Prinzipien

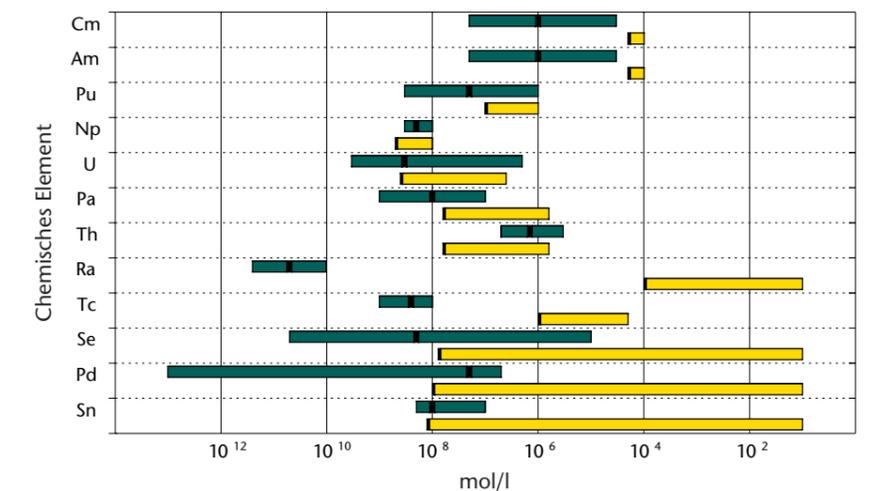
Eine PSI-Forschungsgruppe baut so genannte thermodynamische Datenbanken für die relevanten chemischen Elemente auf. Es sind Sammlungen von grundlegenden Zahlenwerten, die unser heutiges chemisches Wissen quantitativ zusammenfassen, gleichsam codieren. Mit diesem codierten Wissen kann die geringe Löslichkeit der eingelagerten chemischen Elemente nun auch für experimentell nicht zugängliche Systeme zuverlässig vorausgesagt werden, z.B. für ein Endlager. Solche Prognosen werden möglich, weil die grundlegenden thermodynamischen Prinzipien allgemein gültig sind.

Die Grafik demonstriert die Fortschritte der PSI-Forscher auf diesem Gebiet. Sie

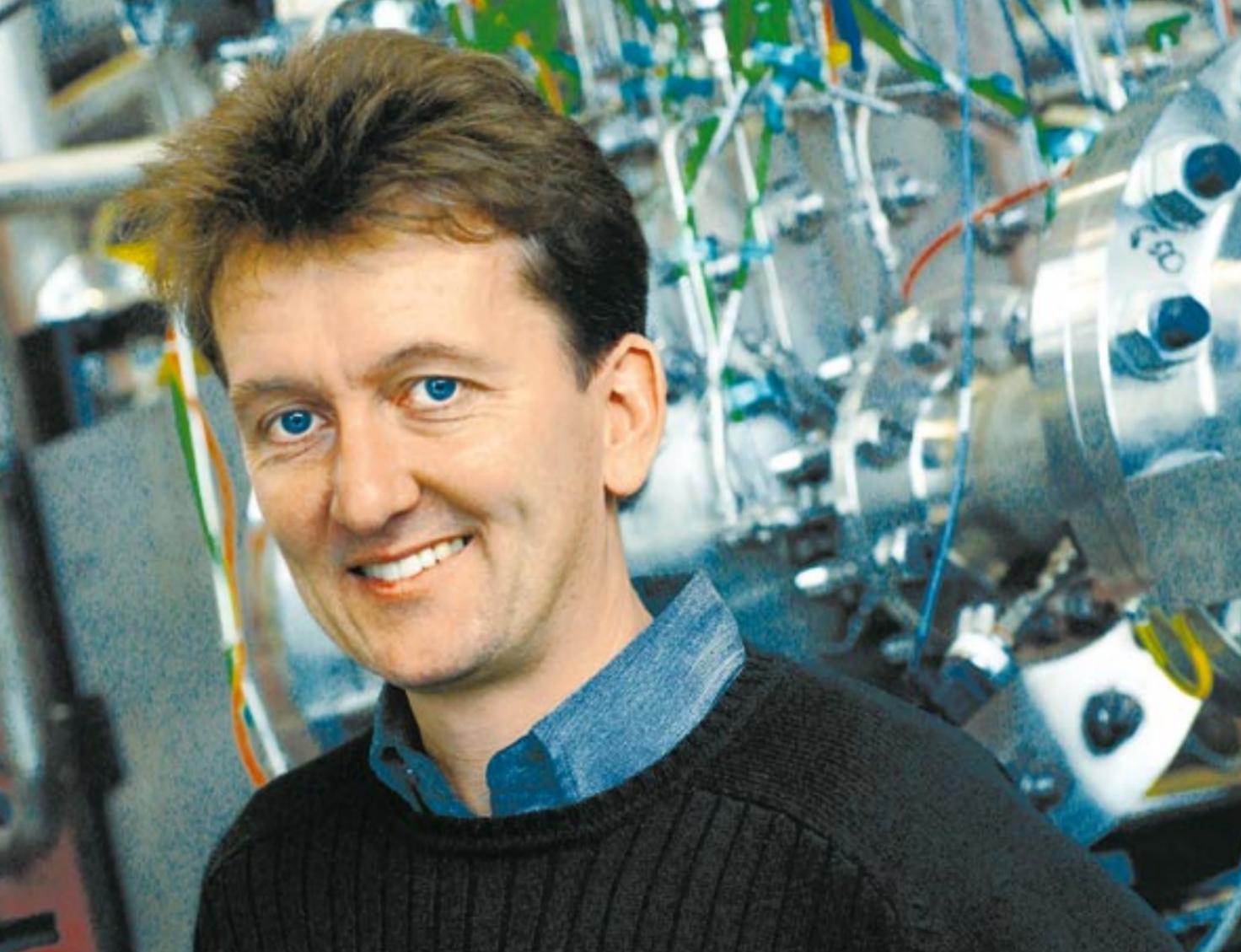
zeigt Löslichkeiten und Variationsbreiten von sicherheitsrelevanten chemischen Elementen im Endlager für hochaktive Abfälle. Den Berechnungen zu Grunde liegt das Porenwasser von Bentonit (ein tonreiches Verfüllmaterial). Die zukünftige Forschung auf dem Gebiet thermodynamischer Datenbanken soll die Unsicherheiten weiter verkleinern.

Das üblicherweise verwendete Konzentrationsmass mol/l entspricht $6,023 \times 10^{23}$ Teilchen, aufgelöst in 1 Liter Wasser. Zum Vergleich: Meerwasser enthält etwa 0,5 mol/l Kochsalz, unser Magensaft bis zu 0,1 mol/l Salzsäure und Leitungswasser $0,000'000'003$ (3×10^{-9}) mol/l gelöstes Uran.

- Curium (Cm)
- Americium (Am)
- Plutonium (Pu)
- Neptunium (Np)
- Uran (U)
- Protactinium (Pa)
- Thorium (Th)
- Radium (Ra)
- Technetium (Tc)
- Selen (Se)
- Palladium (Pd)
- Zinn (Sn)



Fortschritte der PSI-Wissenschaftler auf dem Gebiet der Entsorgungsforschung: Die Balken stellen Variationsbreiten der Löslichkeiten chemischer Elemente in einem Endlager dar. Gelb markiert frühere Kenntnisse und Unsicherheiten (Projekt Gewähr, 1985), Grün repräsentiert den heutigen Kenntnisstand (Projekt Opalinuston, 2002). Künftige Forschungsarbeiten sollen die Unsicherheiten (Balkenlänge) weiter verkleinern.



Gelassen im Rampenlicht

Felix Büchi

Er kommt mit Bahn und Fahrrad zur Arbeit und macht sich über den Privatverkehr seine kritischen Gedanken. Doch dies hindert den Verantwortlichen des PSI für Brennstoffzellen-Systeme nicht daran, sich für zukunftsweisende Technologie auf der Strasse einzusetzen. Mit viel Idealismus, wie er betont.

Felix Büchi

Felix Büchis zerbeulter Alukoffer bietet nicht etwa Werkzeugen und Messgeräten Platz, wie man es von einem Mann, der am Auto der Zukunft forscht, erwarten könnte. Nein, der Koffer schützt auf Reisen

teresse stiess zum Beispiel im vergangenen Jahr ein mit Brennstoffzellen aus dem PSI aufgerüsteter VW Bora. Im winterlichen Härtetest bezwang der mit Wasserstoff betriebene Wagen den Simplonpass

Nicht nur Forschungsberichte, sondern Prototypen

Büchis Laptop. Und unterwegs ist der Spezialist für Brennstoffzellen mehr, als ihm lieb ist. 50 Tage waren es zum Beispiel im vergangenen Jahr – von der Vortragsreise nach Südkorea, über die regelmässigen Besuche bei Entwicklungspartnern im In- und Ausland, bis zu einer Konferenz in den USA.

Die häufigen Reisen haben viel mit der wachsenden Publizität zu tun, die Büchis Forschungsgegenstand genießt. Auf reges öffentliches In-

und war danach viel bestaunter Gast am Genfer Automobilsalon. Das Rampenlicht hat allerdings seine Kehrseiten: Die Erwartungen an die Forscher wachsen in den Himmel; der Erfolgsdruck steigt und steigt.

«Brennstoffzellen werden die Energieprobleme der Zukunft nicht lösen», stellt Felix Büchi deshalb klar und sucht bedächtig nach einer möglichst präzisen Formulierung. «Die Zellen sind nicht die Lösung, aber sie können dazu beitragen, ein System aufzubauen, das sich auf erneuerbare Energien abstützt.» Wann das Brennstoffzellenauto allerdings als Massenprodukt zu kaufen sei, stehe noch in den Sternen.

Im Labor steht Felix Büchi nur noch wenig. Aus dem Elektrochemiker, der 1991 nach Forschungsaufenthalten in Australien und in Texas ans PSI kam, um in einem kleinen Team neue Membranen für Brennstoffzellen zu entwickeln, ist ein ei-

gentlicher Forschungsmanager geworden. Er organisiert, koordiniert und knüpft Kontakte zu neuen Partnern. Büchis Begeisterung für seine Arbeit jedoch ist dieselbe geblieben: «Mich fasziniert, wie viele Forschungsrichtungen bei dieser Technologie zusammenkommen – von Chemie über Materialforschung und Mechanik bis zur Steuerungselektronik. Erfolg ist nur möglich, wenn es uns gelingt, all diese Disziplinen zu integrieren.»

Und noch etwas motiviert ihn: Läuft alles nach Plan, stehen am Schluss von Büchis Vorhaben nicht nur Forschungsberichte, sondern Prototypen. Ziel des PowerPac-Projekts etwa ist ein tragbarer Stromgenerator auf Brennstoffzellenbasis. Ob Alphütte, Leichtelektromobil oder Strassenmusik – den potenziellen Einsatzmöglichkeiten sind keine Grenzen gesetzt.

Die Brennstoffzellen-Anwendungen des Labors für Elektrochemie basieren nicht nur auf Grundlagenforschung, sondern orientieren sich auch an ganz praktischen Problemen. «Manchmal drängt die Zeit, da müssen wir Lösungen um jeden Preis finden – auch wenn wir nachher den Lösungsansatz nicht immer systematisch aufarbeiten können.» Ein Schönheitsfehler, so scheint es, mit dem Felix Büchi ganz gut leben kann.

Kaspar Meuli



Membranen im Dauertest



Langlebig: 200'000 km bei durchschnittlich 50 km/h entspricht einer Betriebsdauer, welche die Brennstoffzellen-Membran im Dauertest erreicht.

Während 4000 Stunden voll funktionstüchtig: Das Resultat ist ein wesentlicher Fortschritt bei der Entwicklung kostengünstiger Kunststoffmembranen.

Protonenleitende Polymerelektrolytmembranen, an der Oberfläche mit Elektrokatalysatorpartikeln beschichtet, trennen Anode und Kathode und sind das Aktivitätszentrum einer Brennstoffzelle mit einem Polymerelektrolyt. Dieser Zellentyp ist für die direkte elektrochemische Energieumwandlung von Wasserstoff in Elektrizität für verschiedene Anwendungen von grossem Interesse – z. B. für wasserstoffbetriebene Elektroautomobile, wie das PSI-Projekt des VW Bora HY.POWER (siehe Seite 81) zeigt.

Damit die Technologie am Markt eine Chance hat, müssen die Kosten deutlich sinken. Das PSI arbeitet seit einigen Jahren an einem Verfahren, das die Prozessschritte und vor allem die Chemie der Membranherstellung vereinfacht und dadurch auch verbilligt. Dabei sind Kompromisse bezüglich der Stabilität der Membran erforderlich. Nun konnte nachgewiesen werden, dass die Membranen bei den gewünschten Betriebstemperaturen für Fahrzeuge (80 °C) unter Laborbedingungen über 4000 Stunden in der H₂/O₂-Brennstoffzelle stabil sind – ein bedeutender Fortschritt.

Schwachstellen ausloten und verbessern

Mit verschiedenen Messtechniken lassen sich die entscheidenden elektrochemischen Grössen des Energiewandlers ermitteln.

Die Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle ist eine Schlüsseltechnologie für die effiziente und nachhaltige Elektrizitätserzeugung und eignet sich besonders gut für mobile Anwendungen. Um die Technologie zur Marktreife zu bringen, ist es entscheidend, die leistungsbestimmenden Faktoren in einem gewählten Betriebszustand bestimmen zu können. Damit lassen sich die Schwachstellen der Brennstoffzelle effizient und gezielt verbessern.

Die Einrichtungen und das technische Know-how am PSI ermöglichen die weltweit einzigartige Kombination ver-

schiedener Messverfahren, um die grundlegenden Prozesse der Brennstoffzelle auszuloten. So zeigt die Neutronen-Radiografie an der Spallations-Neutronenquelle (SINQ), wie sich die Flüssigkeiten und Gase in den Bipolarplatten örtlich verteilen. Rückschlüsse



auf die Funktionsweise solcher Verteilerelemente lassen sich durch den Vergleich mit dem lokal erzeugten Strom ziehen. Auch können wir die Brennstoffzelle gezielt aus einem stationären Zustand auslenken, um die Reaktion darauf zu analysieren. Auf diese Art lassen sich die leistungsbestimmenden Grössen des Systems ermitteln. Neben der Impedanz-Spektroskopie kommt auch eine von Elektronikspezialisten des PSI entwickelte Strompuls-messanlage von höchster Präzision zum Einsatz.

Brennstoffzellen-Forschung am PSI (Bild H. R. Bramaz).

Hohe Ströme bringen mehr Leistung

Die über zehnjährige Erfahrung des PSI in der Batterieforschung fließt in die gezielte Materialwahl: Grafit in Elektroden verträgt sehr hohe Ströme.

Für den erwarteten Einsatz von grossen Lithium-Ionen-Batterien in Autos (als Starter- und 42-Volt-Bordbatterie) wie auch als Batterie für Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge ist eine sehr hohe Strombelastbarkeit gefragt. Die Anforderung verlangt eine Optimierung aller Batteriekomponenten. Zusammen mit der Firma TIMCAL SA in Bodio TI werden am PSI Grafitelktroden verbessert. Um die Elektroden auch auf ihre Eignung im Hochstrombereich hin zu prüfen, hat ein PSI-Forschungsteam ein spezielles Messverfahren und verbesserte Elektroden entwickelt.

Der Belastbarkeitstest besteht aus einer Serie ausgewählter Stromstärken, mit denen spezielle Testzellen ge- und entladen werden. Das Resultat: Bei dünnen Grafitelktroden (50–80 µm) sind Entladungsraten von über 10 C möglich – d.h. die Gesamtladung kann in 6 Minuten entnommen werden. Gegenüber dem Stand der Technik bedeutet das Ergebnis eine Verzehnfachung der Strombelastbarkeit. Beim Laden solcher Grafitelktroden wurden nur geringfügige Ladungsverluste festgestellt, was die bekanntlich sehr gute Stabilität bestätigt. Als Spitzenwert wurde beim Entladen eine maximale C-Rate von 12 C bei 80 % der maximalen Ladung erreicht.

Der Weg des Grafits vom Pulver (vorne) über die Elektrodenherstellung bis zu den Zellen für elektrochemische Untersuchungen (hinten).

C-Rate: Mass, um die Stromstärke beim Entladen (oder Laden) einer Batterie auszudrücken. Bei einer C-Rate von 1 entlädt eine Zelle ihre Nennkapazität in einer Stunde, bei 10 C in 6 Minuten.



Neuartiges Reflektometer

Ulbricht'sche Kugel: Eine innen matt-weiss gestrichene Hohlkugel, die das von der Probe reflektierte Licht sammelt und es ermöglicht, dieses an einer Stelle der Kugelwand zu beobachten, die nicht direkt vom eingestrahelten Licht getroffen wird.



Das PSI-Reflektometer: Weisses Licht wird von oben links auf die Probe (im Metallbehälter) gerichtet und gibt Aufschluss über deren Strahlungseigenschaften.

Eine spezielle Apparatur misst das Reflexionsvermögen von Materialien und dient der Entwicklung von Solarreaktoren.

Gebündeltes Sonnenlicht in speicherbare und transportierbare Brennstoffe umwandeln: Das PSI untersucht dazu verschiedene chemische Reaktionen und entwickelt Solarreaktoren. Um solche Reaktoren zu entwerfen und zu modellieren sowie zur Durchführung berührungsloser Hochtemperatur-Messungen ist es notwendig, die Strahlungseigenschaften der reagierenden Stoffe und der Konstruktionsmaterialien bei hohen Temperaturen zu kennen. Messungen des Reflexionsvermögens sind ebenfalls bedeutend für die Fernsteuerung chemischer Reaktionen.

Zur Messung des Reflexionsvermögens entwickelte das PSI eine neue Methode. In einer eigens für diesen Zweck gebauten Apparatur wird gebündeltes, weisses Licht auf eine Probe in einer Ulbricht'schen Kugel gerichtet. Das reflektierte Licht wird dort in einem Lichtleiter gesammelt, zu einem Spektrografen gesandt und mit einer ICCD-Kamera aufgezeichnet. Das Signal der Probe wird später mit demjenigen eines Referenzmaterials verglichen. Das Verfahren erlaubt die gleichzeitige Messung des Reflexionsvermögens innerhalb eines breiten, kontinuierlichen Wellenlängenbereichs (510 bis 860 nm). Zurzeit können Messungen des Reflexionsvermögens bei Temperaturen bis zu 930 °C (1200 K) unter verschiedenen Atmosphären durchgeführt werden.

Dreimal weniger Stickoxide als bisher

ppmv (parts per million volume):
1 Volumenteil in 1 Million
(Konzentrationsmass).

Durch die katalytisch stabilisierte Verbrennung (CST) lassen sich NO_x -Emissionen in stationären Gasturbinen drastisch reduzieren. Am PSI werden numerische Modelle für deren Auslegung in Gasturbinen-Brennkammern entwickelt und experimentell überprüft.

Dank der CST-Technologie sinken die Stickoxid-Emissionen (NO_x) in Gasturbinen auf mindestens dreimal geringere Werte (<3 ppmv) als bei bisher verwendeten Methoden. Die derzeitigen Bemühungen konzentrieren sich auf den Einsatz in grösseren Gasturbinen (>20 Megawatt) und das Verständnis der zu Grunde liegenden Reaktionskinetik.

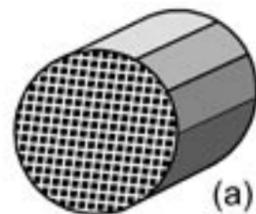
In den letzten Jahren hat sich der Trend zur schadstofffreien Energieproduktion (ohne NO_x - und CO_2 -Ausstoss) verstärkt. In einigen Gebieten strebt die Gesetzgebung NO_x -Emissionen in stationären Gasturbinen von weniger als 3 ppmv an. Im Vergleich zu anderen Technologien für die NO_x -Nachbehandlung erfüllt die CST-Technologie

diese Forderungen, wobei zusätzlich die entstehenden Kosten am geringsten sind.

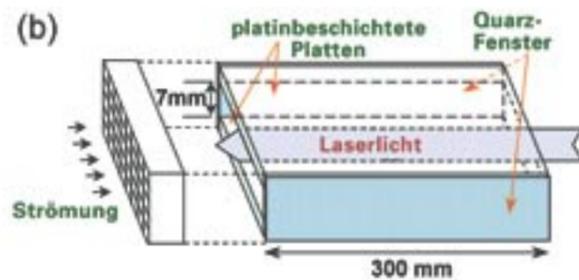
Exklusive Software für Simulationen

Bild a zeigt einen kommerziellen Katalysator, der aus zahlreichen katalytisch beschichteten Kanälen besteht. Mit ihm lassen sich jedoch nicht Verbrennungsprozesse in einem einzelnen Kanal untersuchen. Das PSI hat deshalb einen optisch zugänglichen, katalytischen Reaktor für Messungen unter Hochdruck entwickelt, der weltweit einzigartig ist (Bild b). Mit Hilfe von Laser-Diagnostik können chemische Komponenten und Temperatur räumlich aufgelöst gemessen und mit Berechnungen verglichen werden. Dazu dient ein am PSI entwickeltes Software-Programm, von dem international nur zwei weitere existieren. Ziel des Vergleichs ist die Validierung verschiedener Reaktionsmechanismen unter relevanten Betriebsbedingungen von Gasturbinen.

Im Bild unten wird die gemessene und berechnete Verteilung des OH-Radikals innerhalb des Kanals für ein Methan-Luft-Gemisch über Platin bei einem Druck von 3 bar verglichen. Die gute Übereinstimmung zeigt, dass das numerische Modell für die Berechnung des Zündpunktes der Gasphasenverbrennung bei CST benutzt werden kann. Das validierte Modell kann nun für das Design eines wabenförmigen Katalysators verwendet werden (wie in Bild a), um eine Zündung der Gasphase innerhalb des Katalysators zu vermeiden.

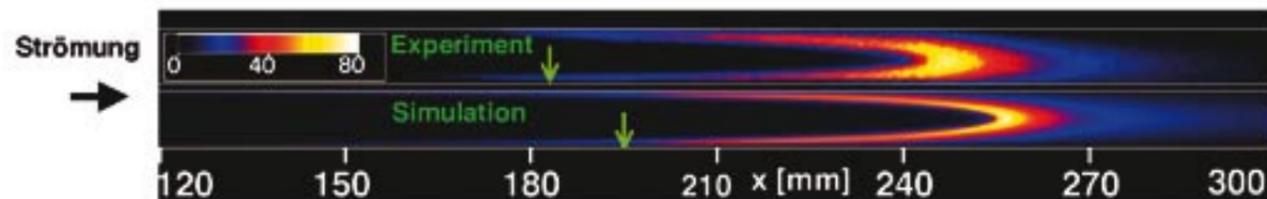


Kommerziell: Wabenförmiger Katalysator für Gasturbinen.



Weltweit einzigartig: Der am PSI entwickelte, optisch zugängliche katalytische Reaktor.

Experiment und Simulation: Die gemessene (oben) und berechnete (unten) Verteilung (in ppmv) des OH-Radikals im Katalysator stimmen gut überein. Die Pfeile kennzeichnen den Zündpunkt der Verbrennung in der Gasphase.



Mehr Kohlendioxid und die Folgen



Die Untersuchungen der CO_2 -Problematik mit stabilen Isotopen am PSI führen fortlaufend zu neuen Erkenntnissen über Prozesse im Ökosystem.

Nebst dem Treibhauseffekt beeinflusst die Zunahme des atmosphärischen CO_2 die Biosphäre in ihren Stoffwechselprozessen nachhaltig. Die Tatsache, dass bei erhöhter CO_2 -Konzentration das Wachstum der Pflanzen stimuliert wird, dürfte zur Meinung geführt haben, dass die Vegetation die in der Luft zunehmende CO_2 -Menge kompensiert. Diese scheinbar nahe liegende Folgerung lässt eine Reihe von Problemen unbeantwortet. Gemeinsam untersuchen

Forschende des PSI und der Universität Basel im Swiss Canopy Crane Projekt (Leitung: Prof. Ch. Körner, Uni BS), wo und in welcher Form das zusätzlich gebundene CO_2 wieder auftritt.

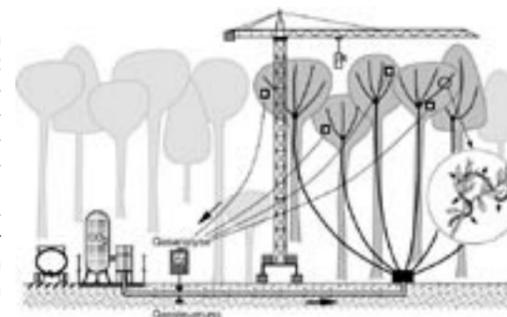
Um solche Fragen zu beantworten, ist die Analyse stabiler Isotope bestens geeignet. Indem künstliches CO_2 zugefügt wird, sind die Baumkronen einer erhöhten CO_2 -Konzentration von 550 ppmv (Volumenteile in 1 Million) ausgesetzt. Das künstliche Kohlendioxid enthält im Vergleich zum CO_2 in der Luft deutlich weniger ^{13}C . Das stabile, schwerere und natürlich vorkommende Kohlenstoff-Isotop dient so als idealer Tracer (Mar-

kierungssubstanz). Zur Untersuchung des Wasserhaushalts eignet sich das schwerere Sauerstoff-Isotop ^{18}O .

Erste Resultate zeigen, dass durch erhöhtes CO_2

- die von den Bäumen gebildeten Kohlenhydrate deutlich schneller und in grösserem Ausmass als bisher vermutet in den Boden transportiert und dort zumeist wieder veratmet werden. Somit sind Böden viel geringere Kohlenstoffsenken als bislang postuliert wurde;
- die mengenmässigen Anteile der verschiedenen Holz-Komponenten verschoben werden, was sich vermutlich in der Holzqualität niederschlägt;
- die Blattoffnungen sich verkleinern und so die Transpiration reduziert wird. Dies erhöht den Bodenwassergehalt, wodurch die Mikroorganismen-Population im Boden und damit die Abbauprozesse verändert werden.

Künstliches Kohlendioxid (CO_2) wird mit Bewässerungsschläuchen in den Baumkronen verteilt (ca. 2 Tonnen pro Tag). Infrarot-Gasanalytoren überwachen die CO_2 -Konzentration und ein computergesteuertes Ventilsystem stellt einen Sollwert von 550 ppmv sicher. Anhand einer an einem Kran befestigten Gondel haben Forscher mit ihren Instrumenten beliebigen Zugang zum Baumkronenraum (kleines Bild).



Die langjährigen Erfahrungen am PSI über Strategien und Technologien für nachhaltige Lösungen sind nun in einem Standardwerk veröffentlicht.

Nie zuvor gab es so viele Siedlungsabfälle zu entsorgen. In der Schweiz sind es derzeit insgesamt 2,6 Millionen Tonnen pro Jahr. Der Müllhaufen wird aber nicht nur immer grösser, sondern auch giftiger. So enthalten Filteraschen aus Kehrverbrennungsanlagen ver-

Abfallmanagement

Wie mit dem Müll fertig werden

chiedenste Schwermetalle. Die Verfahren zur Abfallbehandlung bestimmen weitgehend die Auswirkungen auf die lokale und globale Umwelt. Neue Technologien könnten aus dem Abfall die Rohstoffe zurückgewinnen und die im Abfall gespeicherte Energie zur Wärme- und Stromerzeugung nutzen. Giftige Rückstände würden verschwinden.

Die technisch-ökologischen Möglichkeiten, die soziale Akzeptanz für neue Technologien und das marktwirtschaftliche Umfeld sind Schlüsselgrössen, die massgeblich die Rahmenbedingungen

für die Realisierung neuer Technologien setzen. Unterstützt vom Schweizerischen Nationalfonds, in Zusammenarbeit mit Industrie, Behörden und internationalen Experten stellen sich die Forschenden am PSI seit über einem Jahrzehnt den Herausforderungen in der Abfallwirtschaft. Nun wurden die Erkenntnisse in einem vom Springer-Verlag herausgegebenen Standardwerk publiziert – unter dem Titel «Municipal Solid Waste Management – Strategies and Technologies for Sustainable Solutions».

Das Benutzerlabor

Von Menschen & Maschinen

Entwicklung des PSI als Benutzerlabor

Porträts & Projekte zum Bau & Betrieb
der Forschungsanlagen



Ein internationaler Anziehungspunkt

Spallation:
Werden Neutronen durch eine Kollision von Protonen mit neutronenreichen Elementen (Uran, Blei) erzeugt, spricht man von Spallation.

Leptonen & Quarks:
Die nach heutigem Wissensstand elementarsten Bausteine der Materie.

Nanowissenschaft, Nanotechnik
befasst sich mit Objekten, deren Abmessungen im Bereich von Nanometern (nm) liegen. Ein Nanometer entspricht einem Millionstelmillimeter (10^{-9} m).

Das PSI stellt als Benutzerlabor den Forschungsgemeinschaften aus Universitäten und Industrie seine Anlagen für Experimente zur Verfügung. Dieses Angebot wurde im Berichtsjahr weiter ausgebaut und wird auch in Zukunft an Bedeutung zunehmen.

Gemäss strategischer Ausrichtung soll die Elementarteilchenphysik am PSI leicht reduziert werden, die Forschung mit Myonen (μS) etwa gleich bleiben, die Nutzung der Neutronenquelle (SINQ) und vor allem der neuen Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) jedoch markant steigen (siehe Grafik Seite 88). An jeder Forschungsanlage stehen zahlreiche Apparaturen zur Verfügung, die gleichzeitig genutzt werden können. Manche davon sind weltweit einmalig. Deshalb wächst nicht nur die quantitative Bedeutung des PSI als Benutzerlabor, die Qualität der Forschung an den PSI-Anlagen zählt zur Weltspitze. Sicherergestellt wird dies unter anderem durch die Forschungskommission des PSI, durch die beratenden Komitees der Bereiche und durch regelmässige Expertenbeurteilungen, so genannte Audits.

Mehrere SLS-Strahllinien im Aufbau

Mit der 2001 in Betrieb genommenen SLS erhielt das PSI einen gigantischen

Röntgenapparat und gleichzeitig ein riesiges Mikroskop. Synchrotronlicht ist eine scharf gebündelte elektromagnetische Strahlung, die von extrem schnell fliegende Elektronen ausgesandt wird. Es dient der Erforschung von neuartigen Materialien, Biomolekülen sowie von Mikro- und Nanostrukturen. Das Verständnis mikroskopischer Eigenschaften bringt bedeutende Fortschritte, beispielsweise in der Halbleitertechnik, der Hochtemperatur-Supraleitung, der magnetischen Datenspeicherung, der gezielten Entwicklung von Arzneimitteln und von Materialien für die Energie- und Umweltforschung. Die Nachfrage nach Synchrotronstrahlung ist hoch, deshalb werden mehrere neue Strahllinien aufgebaut (Seite 48).

Seit mehr als 20 Jahren betreibt das PSI mit grossem Erfolg einen Protonen-Beschleuniger, der dank Weiterentwicklungen den Leistungs-Weltrekord hält. Den Protonenstrahl nutzen Forschergruppen für Experimente in Elementarteilchen-, Festkörper- und Materialforschung; er wird aber auch für medizinische Zwecke wie Tumorthherapie eingesetzt. Anschliessend wird der verbleibende, jedoch sehr intensive Protonenstrahl auf die Spallations-Neutronenquelle (SINQ) gelenkt. Die Protonen treffen dort mit hoher Geschwindigkeit auf ein Target aus Blei, in

das sie eindringen. Durch die Kollision der Protonen mit den Bleikernen werden diese stark angeregt und setzen Neutronen frei, so genannte Spallations-Neutronen. Im Gegensatz zur Kernspaltung tritt bei der Spallation keine Kettenreaktion auf.

Erfolgreiches Betriebsjahr für SINQ

2002 war für die SINQ mit ihren neun Instrumenten ein überaus erfolgreiches Betriebsjahr. Im November stand mit POLDI das zehnte Instrument zur Verfügung (Seite 62). Seit die Nutzung der Anlage von der EU im 5. Rahmenprogramm unterstützt wird (ca. 2,8 Mio. Franken für SINQ und μS), ist das Interesse enorm gestiegen – mit Rekordzahlen. Insgesamt wurden an den neun Instrumenten an rund 4600 Benutzertagen 315 Experimente durchgeführt. Zu verzeichnen waren 268 Benutzer, davon fast 60% aus der Schweiz. Die internationale Nutzergemeinschaft kommt aus 21 verschiedenen Ländern, allen voran Deutschland, Dänemark und Grossbritannien. Eine Umfrage im Herbst 2002 ergab eine markant hohe Nutzerzufriedenheit, mit Höchstwerten in den Bereichen Instrumentenqualität und technische Unterstützung bei den Experimenten.

Experimente zur Teilchenphysik

Mit dem Protonenstrahl des PSI lassen sich intensive Sekundärstrahlen aus Pionen und Myonen erzeugen, die unter anderem für Teilchenphysik-Experimente verwendet werden. Da diese Strahlen die weltweit beste Qualität aufweisen, sind sie nicht nur bei Forschungsgruppen aus ganz Europa, sondern auch aus den USA und Japan gefragt. Pionen sind die leichtesten der aus Quark/Antiquark-Paaren bestehenden kurzlebigen Mesonen. Myonen sind kurzlebige Elementarteilchen aus der Familie der Leptonen, den Elektronen ähnlich, jedoch ca. 200-mal schwerer. Die Experimente am PSI erforschen fundamentale Eigenschaften von Pionen und Myonen, wobei besonders nach sehr subtilen, für das Verständnis der Teilchenphysik aber äusserst wichtigen Details gesucht wird. Die SINQ liefert ausserdem einen hoch intensiven



SINQ: Spallations-Neutronenquelle.

polarisierten Strahl kalter Neutronen zum Studium fundamentaler Eigenschaften des Neutrons.

Sechs Instrumente mit Myonen

Implantiert man Myonen in Materie, geben die winzigen magnetischen Kreisel mit hoher Präzision Auskunft über die inneren, lokalen Magnetfelder. Dank ihrer elektrischen Ladung sind sie auch sehr empfindliche Sonden für strukturelle Defekte in Kristallen und Verunreinigungen in Materialien. Für die Forschung mit den am Ringbeschleuniger erzeugten Myonen stehen am PSI sechs verschiedene Instrumente zur Verfügung – darunter der selbst entwickelte und weltweit einmalige niederenergetische Myonenstrahl. Mit die-

sem können Myonen kontrolliert in geringer Tiefe (wenige 100 Nanometer) unter die Probenoberfläche implantiert werden, was eine Fülle von neuen Anwendungen erschliesst.

Saniertes Hotlabor

Das Hotlabor am PSI dient der angewandten Materialforschung an stark radioaktiven Proben und der Entsorgungsforschung. Die Proben stammen vorwiegend aus Reaktorkernen von schweizerischen Kernkraftwerken sowie aus Forschungsreaktoren, der SINQ und dem Ringbeschleuniger am PSI. Das Hotlabor wurde saniert und nachgerüstet und konnte im Mai 2002 wieder den vollen Betrieb aufnehmen (Seite 50).

μS : Myonspin-Resonanz.



SLS: Synchrotron Lichtquelle Schweiz.



Hotlabor.





Noch mehr Licht auf die Materie

Leonid Rivkin

Lenny Rivkin bezeichnet sich selbst als Maschinenbauer – von möglichst grossen Maschinen. Dass er am PSI eine Synchrotron-Lichtquelle nach dem neuesten Stand der Technik entwickeln konnte, war für ihn also eine Möglichkeit, genau das zu tun, was er am liebsten macht.

Leonid Rivkin

Leonid Rivkin wuchs in Odessa auf, einer Hafenstadt mit einer Million Einwohnern am Schwarzen Meer. Im Sommer, sagt er, sei das Klima so herrlich, dass Freunde und Verwandte immer schon im April geschrieben hätten, um ihren Besuch anzukündigen. Neben dem Einfluss

ford Linear Collider zu arbeiten. Er war auch am Projekt des grossen Elektron-Positron-Speicherrings am CERN in Genf beteiligt, bevor er vor 13 Jahren ans PSI kam.

Rivkin war von Anfang an begeistert bei der SLS dabei. Synchrotronlicht sei ein hoch interessantes Phäno-

Anforderungen der Schweizer Benutzer erfüllt – und dies im vorgegebenen Zeit- und Budgetrahmen.

Keine leichte Aufgabe. Aber der Bau eines Beschleunigers ist auch kein gewöhnliches Unterfangen. Rivkin vergleicht es mit dem Bau einer Kathedrale im Mittelalter. Dieser dauerte ebenfalls viele Jahre und erforderte eine enge Gemeinschaft von Handwerkern mit einer ausgeprägten Tradition mündlicher Überlieferung. In der Tat stand das Team während der gesamten Konzeptionsphase in einem intensiven Austausch mit Kollegen in der ganzen Welt, wodurch es auf vorhandenes Fachwissen und Know-how zurückgreifen konnte.

Das Vorgehen zahlte sich aus. Die SLS wurde zum ersten Mal Ende Dezember 2000 angeschaltet und funktionierte sofort. «Es war ein fantastisches Weihnachtsgeschenk», sagt Rivkin, der mit seiner schweizerischen Ehefrau, die er am CERN kennenlernte und der gemeinsamen 13-jährigen Tochter in Baden lebt. Die SLS ist zum Massstab für Lichtquellen in der ganzen Welt geworden. So geniesst es Rivkin, an der ETH Zürich zu unterrichten und zusammen mit seinen Kollegen Pläne auszuhecken, wie noch mehr (Synchrotron-)Licht auf die Materie geworfen werden kann.

Giselle Weiss

Wie der Bau einer Kathedrale

seines Vaters, eines Ingenieurs, nennt Rivkin zwei ungewöhnliche Lehrer, die sein Interesse an Mathematik und Physik geweckt hätten. Während der Mittelschule nahm er an internationalen wissenschaftlichen Wettbewerben teil.

Im Jahr 1975 zog Rivkins Familie nach Boston, und er trat als Student in die Harvard Universität ein. Schon früh fasziniert von der Beschleunigerphysik, wechselte er ans California Institute of Technology, um die höheren Fachsemester zu belegen. Aber er gibt zu, dass er die meiste Zeit an der Stanford University verbrachte, um dort am Stan-

ford Linear Collider zu arbeiten. Er war auch am Projekt des grossen Elektron-Positron-Speicherrings am CERN in Genf beteiligt, bevor er vor 13 Jahren ans PSI kam. Rivkin war von Anfang an begeistert bei der SLS dabei. Synchrotronlicht sei ein hoch interessantes Phänomen, sagt er: Ein Prozess, bei dem Elektronen beschleunigt und abgelenkt werden, was sie «so heftig ärgert, dass sie schliesslich anfangen, Licht auszusenden». Als dies zum ersten Mal entdeckt wurde, betrachtete man dieses Licht noch als nachteilig. Doch heute nutzen die Wissenschaftler die Synchrotronstrahlung – eine Million Mal heller als die Sonne –, um den Aufbau des Lebens zu enträtseln, die Beschaffenheit von Materialien zu erforschen und über die Echtheit von Kunstwerken zu entscheiden.

Zusammen mit anderen Kollegen bestand Rivkins Aufgabe im Design der Hauptkomponenten der SLS, einschliesslich des Elektronen-Injektors und des Speicherrings. Von Anfang an war sich das Team einig, dass eine Lichtquelle nach dem neuesten Stand der Technik entwickelt und gebaut werden soll, welche die bisherigen Anlagen an Brillanz und Stabilität übertrifft und die



Raffiniert den Elektronenstrahl strecken

Kavität: Hohlraum, in dem geladene Teilchen beschleunigt werden.

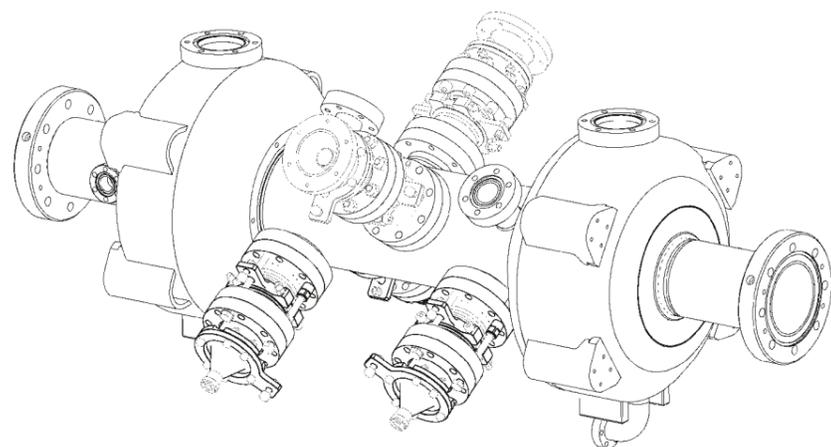
Resonanz: durch Wellen gleicher Schwingungszahl angeregtes Mitschwingen eines anderen Körpers oder schwingungsfähigen Systems.

CERN: Europäisches Labor für Teilchenphysik in Genf.

Die im SLS-Speicherring erfolgreich installierte supraleitende Kavität ist eine Weltpremiere. Das Modul verbessert die Stabilität des Synchrotronlichts und verlängert die Lebensdauer des Elektronenstrahls um mehr als das Zweifache.

Je intensiver und gebündelter Synchrotronlicht sein soll, desto dünner muss auch der zur Lichterzeugung erforderliche Elektronenstrahl sein. Dabei können sich jedoch die eng nebeneinander fliegenden Teilchen gegenseitig abstoßen und so den Strahl aufblähen. Die Störung lässt sich beheben, indem man die einzelnen Strahlpakete verlängert. Dadurch sinkt die Ladungsdichte, und die Lebensdauer des Strahls steigt.

Die Kavität mit den zwei supraleitenden Niobium-Kupfer-Zellen (rechts und links) und den schwingungsdämpfenden Kopplern (in der Mitte).



Das Kühlmodul der Kavität, das die Supraleitung ermöglicht, ist in der Strahlführung des Speicherrings installiert.

Diesen Effekt ruft die im SLS-Speicherring neu eingebaute Kavität hervor. Sie besteht aus zwei supraleitenden Niobium-Kupfer-Zellen, die mit einem Rohr verbunden sind. Daran befinden sich sechs Koppler, die unerwünschte Hochfrequenz-Resonanzen dämpfen sollen. Die Komponenten befinden sich in einem Vakuumbehälter und werden mit flüssigem Helium auf 4,5 Kelvin (-268,5°C) abgekühlt, um den supraleitenden Zustand zu erreichen.

Energieentzug bei hohen Frequenzen

Wenn nun der Elektronenstrahl durch die beiden Zellen rast, regt er eine elektromagnetische Schwingung an, die den Strahl verlängert und demnach die Teilchendichte reduziert. Dank der supraleitenden Kühlung können die Energieverluste klein gehalten werden, die Kavität hat folglich einen sehr hohen Gütefaktor.

Eine internationale Zusammenarbeit führte zum konzeptionellen Design und ermöglichte die Herstellung des Moduls. Beteiligt waren die vier Labors CEA-Saclay bei Paris, CERN in Genf, Sincrotrone Trieste (ST) und PSI, das die theoretischen Aspekte der Wechselwirkung zwischen Strahl und Kavität bearbeitete. Wichtig war auch die Unterstützung eines Teams der ETH Lausanne, welches das komplexe Kältesystem entwarf und installierte.

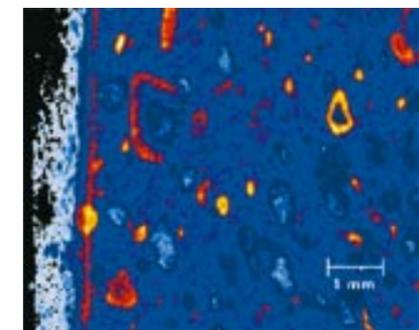
Anfang Oktober 2002 wurde die Kavität in Betrieb genommen. Sie funktionierte wie erwartet: Die einzelnen Strahlpakete liessen sich um den Faktor 3 verlängern, die Lebensdauer des Elektronenstrahls stieg um das 2,2fache. Der Betrieb verlief bis zur Auslege-Stromstärke von 400 Milliampère stabil.

Lichtblitze von Billionstelsekunden nutzen

Nach dem erfolgreichen Aufbau der vier Strahllinien in der ersten Phase hat die zweite Etappe mit der Errichtung dreier weiterer Experimentierstationen begonnen.

Ausgehend von den Bedürfnissen der Benutzergemeinschaft und der allgemeinen Entwicklung der Forschungsrichtung sind zwei Röntgen-Absorptionslinien mit Mikrofokus (MikroXAS, LUCIA) und eine Linie für Protein-Kristallografie (PX II) im Aufbau. Die beiden Röntgen-Absorptionslinien ergänzen sich gegenseitig (MikroXAS: 4 bis 18 keV, LUCIA: 0,8 bis 6 keV). Das Schwerkraft dieser Forschung liegt in den Umweltwissenschaften, insbesondere in der Untersuchung von heterogenen und verdünnten Systemen. Dank der Strahleigenschaften wird z.B. die Bestimmung der räumlichen Verteilung von Spurenelementen oder der lokalen chemischen Umgebung eines absorbierenden Atoms möglich sein. Die MikroXAS-Linie wird vom PSI gebaut, die LUCIA-Linie ist ein Joint-venture des SLS-Teams und der französischen Partnerinstitute SOLEIL und LURE.

Auf Grund der sehr guten Forschungsergebnisse, die sie an der ersten Protein-Kristallografie-Linie erzielten, haben



Unter Synchrotronlicht: Nach biochemischer Verwitterung zeigt die Verteilung von Kobalt (in Zement verfestigt), wie stabil Schwermetall-Abfälle sind. Hohe Konzentrationen von Kobalt-Atomen sind gelb und rot dargestellt.

sich die Pharmafirmen Novartis und Roche sowie die deutsche Max-Planck-Gesellschaft entschlossen, die zweite PX-Linie gemeinsam zu finanzieren (siehe Seite 84).

Die extrem kurze Dauer der Lichtpulse aus dem Speicherring wird zunehmend für das Studium dynamischer Vorgänge eingesetzt. Die typische Zeitdauer an der SLS beträgt heute ca. 30 Pikosekunden. Mit der Kombination eines ultrakurzen Lasers und eines speziellen Wigglers wird man in der Lage sein, die Zeitdauer dieses Blitzes in den Bereich von 100 Femtosekunden zu verkürzen. Damit wird die Messung von ultraschnellen dynamischen Vorgängen möglich, die mit einem Laser angeregt wurden.

Palette von Projekten

An den Sitzungen des Scientific Advisory Committee (SAC) der SLS im Jahr 2002 wurden die Pläne für folgende Vorhaben begutachtet:

- Infrarot-Strahllinie für Spektroskopie und Mikroskopie;
- Strahllinie für dynamische Studien chemischer Vorgänge in Vakuum-Ultraviolett-Bereich;
- Umlagern eines Teiles der Tomografiestation und erweitern zu Radiologie-Studien an einem neu zu installierenden Super-Bend;
- Undulatorlinie für Studien an korrelierten Elektronensystemen unter Ausnutzung der resonanten Röntgenstreuung.

Die detaillierte Ausarbeitung der technischen Auslegung und eines Zeitplanes der verschiedenen Projekte ist im Gang. Mit den zusätzlichen Strahllinien kommen wir dem Ziel der vollständigen und effektiven Auslastung der Experimentiermöglichkeiten an der SLS einen grossen Schritt näher.



Fokussierende Optik für Brennpunkte im Mikrometerbereich, entwickelt für die neue Röntgen-Absorptionslinie LUCIA von den französischen Partnern SOLEIL und LURE (Modellzeichnung).

Strahllinien bestehen aus verschiedenen Komponenten (Magnete, Spiegel, Monochromatoren), mit denen das Synchrotronlicht geeignet präpariert und in die Experimentierapparaturen geleitet wird.

Protein-Kristallografie: Die Proteine (Eiweisse) werden kristallisiert und mit Synchrotronlicht bestrahlt. Das resultierende Beugungsmuster lässt auf die Struktur der Protein-Moleküle schliessen. Die Methode dient vor allem der Entwicklung neuer Medikamente.

Pikosekunde: eine Billionstelsekunde oder ein Millionstel einer Millionstelsekunde (10^{-12} s).

Femtosekunde: eine Billionstelsekunde (10^{-15} s).

Wiggler und Undulatoren: Spezielle Magnete, um Elektronen im Speicherring auf sehr enge Slalombahnen zu zwingen, damit sie extrem gebündeltes, hoch intensives Synchrotronlicht aussenden.

Super-Bend: Ablenkmagnet mit hohem magnetischem Feld (3,1 Tesla).

Saniert und verstärkt im 40. Betriebsjahr

Nach dreijähriger Planungs- und Bauzeit konnte das nachgerüstete Hotlabor im Mai 2002 eingeweiht und für den aktiven Betrieb wieder freigegeben werden.

Das Hotlabor ist eine komplexe kern-technische Anlage zur Erforschung und Entwicklung von Materialien, die in intensiven Kernstrahlungsfeldern eingesetzt werden und stark radioaktiv sind. Die Forschungsschwerpunkte liegen bei der Untersuchung fortschrittlicher Leichtwasserreaktor-Brennelemente für hohe Abbrände und Leistungen und bei Schadensabklärungen an gealterten Komponenten aus schweizerischen Kernkraftwerken. Wichtige Arbeiten sind auch die Materialwahl für das Flüssigmetall-Target der SINQ und für Fusionsreaktoren sowie die Abklärung der Radionuklid-Ausbreitung aus Abfallendlagern.

Sicherheitstechnische Studien hatten aufgezeigt, dass das Hotlabor den heutigen Brandschutzvorschriften nicht mehr genügt. Dieser Befund zog eine

grundlegende gebäudetechnische Sanierung nach sich. Das Labor wurde brandschutz- und strahlenschutztechnisch, aber auch bezüglich Erdbebensicherheit und Gebäudeleittechnik nachgerüstet.

Die Sanierung war geprägt durch die schwierige Aufgabe, kostengünstige Lösungen für die anspruchsvollen baulichen Probleme zu finden, grösstmögliche Sicherheit zu gewährleisten und gleichzeitig den Betriebsunterbruch auf ein Minimum zu beschränken. Das gewählte Sanierungskonzept bestand darin, einen Medien-Installationskorridor über und entlang dem Radiochemie-Trakt hinzuzufügen. Von dort aus wurden die einzelnen Labors auf zwei Etagen neu vertikal mit den Medien versorgt. Grosse komplexe Boxeneinrichtungen und schwere Abschirmungen der Labors, die sich während der Sanierung nicht versetzen liessen, mussten für den Umbau solide und dicht eingekapselt werden. Somit entstand kein radiologisches Problem für die Handwerker.



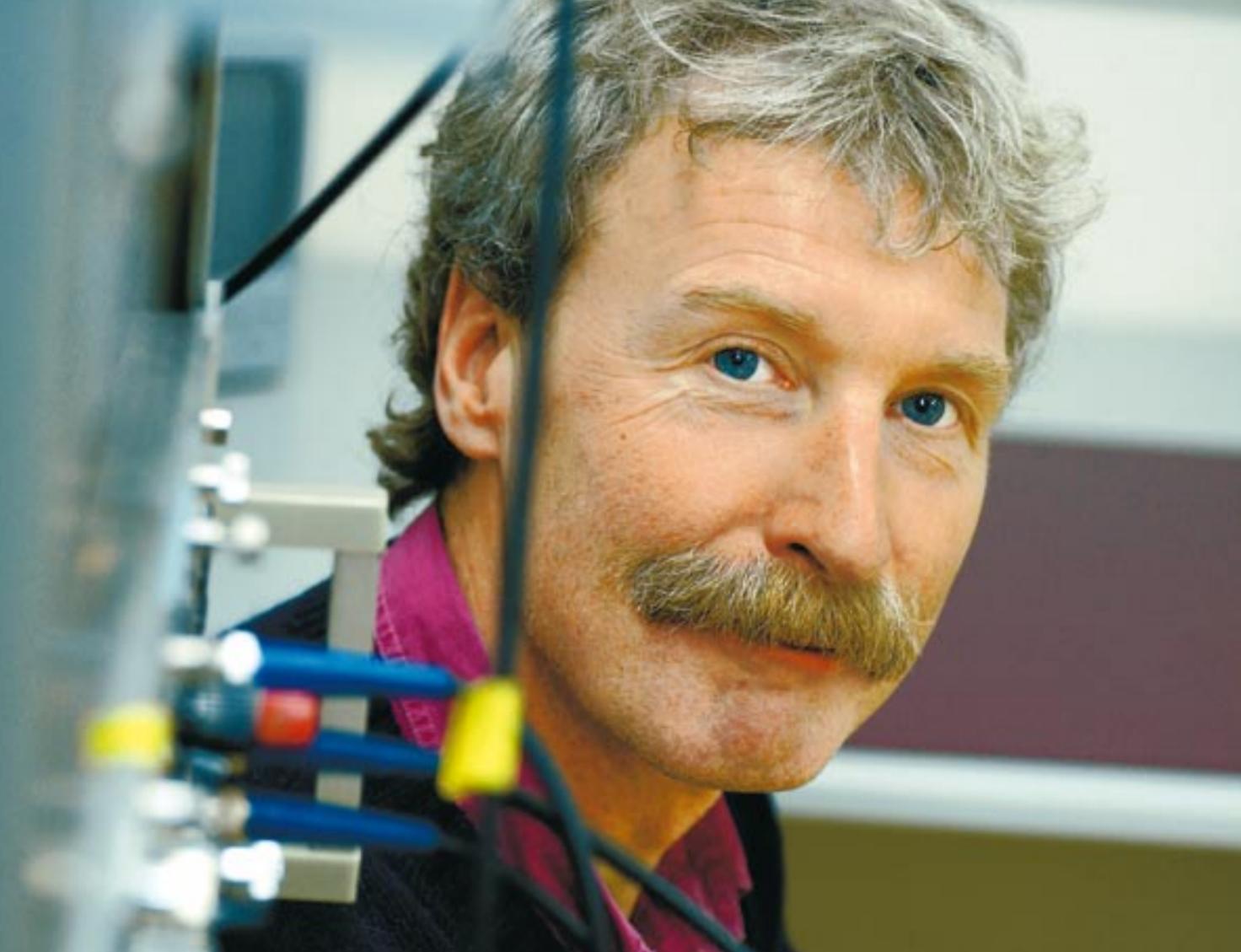
Ungewohnt farbig: Graffito an der nicht renovierten Aussenfassade des Hotlabors.

Um die Erdbebensicherheit zu erhöhen, wurde im Bereich der Fensterfront des Radiochemie-Traktes eine Betonscheibe eingebaut. Anstelle eines fantasie-losen Malerflickwerkes wurde die nicht renovierte Aussenfassade durch einen talentierten Sprayer mit einem erfrischenden Graffito bereichert.



Hotlabor: Forschung mit stark radioaktiven Substanzen.





Experte des stetigen Wandels

Jost Eikenberg

Seine berufliche Leidenschaft gilt Isotopen, die zerfallen. Solch radioaktive Atomkerne verhelfen Jost Eikenberg zu spannenden Befunden – wie der Identität von Meteoriten, dem Alter von Tropfsteinhöhlen oder der Wanderroute von Radionukliden im Fels.

Jost Eikenberg

«Die Oberfläche der Erde ist übersät mit radioaktiven Stoffen», beschreibt Jost Eikenberg sein Beobachtungsrevier. Der Geoforscher kommt ins Schwärmen und erklärt, was die strahlenden Atome dem neugierigen Wissenschaftler alles offenbaren. Mit Spektrometern und andern Messgeräten könne er die verschiedensten Spuren verfolgen. So würden kleinste Plutoniumrückstände in Bodenproben von den ehemaligen oberirdischen Atomwaffentests in der Südsee zeugen oder unterschiedliche Radium-Isotope im Rhein das ein- und ausströmende Grundwasser verraten.

Auf dem Tisch liegt die Karlsruher Nuklidkarte. Sie dokumentiert, wie radioaktive Isotope während ihres Zerfalls Gewicht und Name ändern: Von Uran, dem schwersten natürlichen Element, etwa zu Thorium, Radium, dann zum Edelgas Radon und schliesslich nach einigen Jahrtausenden zu stabilem Blei. Die Karte gilt als Atlas der Radioanalytiker, beschreibt sie doch detailliert die Eigenschaften und Zusammenhänge der wandelbaren Atome.

Seit zehn Jahren leitet Eikenberg das radioanalytische Labor des PSI, das im Bereich Logistik und Marketing (LOG) angesiedelt ist. 80 Prozent seiner Arbeit betrachtet der gebürtige Niedersachsen als wichti-

ge Pflicht. Dazu zählt er normale Kontrollanalysen, die beim Betrieb des grossen Forschungsinstituts anfallen: Luftfilter, Wischtests, Abwasserproben und Radiopharmaka müssen vorschriftsgemäss auf Radioaktivität untersucht werden.



Mit dem Spektrometer auf Spurensuche

Die noch verbleibende Arbeitszeit investiert Jost Eikenberg jedoch in die Forschung. «Das bringt Würze auf die Pizza», meint der Zerfalls-Experte, der nach seinem Diplom als Petrograph an der ETH Zürich promovierte und für seine Doktorarbeit in Geochemie die Silberne ETH-Medaille erhielt. 1988 kam er ans PSI und forschte zunächst auf dem Gebiet der Endlagersicherheit, bis er nach vier Jahren in die Radioanalytik wechselte. Ein Fundus für Forscher, wie er sagt.

Fündig wird der Teamchef mit seiner Gruppe immer wieder; er braucht diese Herausforderung neben der Routine. Ob die Charakterisierung kosmischer Körper (kürzlich wurde ein neuer Mondmeteorit aufgespürt), ob Experimente mit kurzlebigen Brom-Isotopen tief im

Berg, ob die Eichung einer geologischen Uran-Radium-Uhr, Eikenberg scheint alles mit Begeisterung anzupacken. Ohne den damit verbundenen persönlichen Elan und wissenschaftlichen Erfolg wäre auch nicht – so nebenher – die Habilitationssarbeit des frisch gebackenen ETH-Privatdozenten entstanden.

Viel Schwung benötigt der Grenzgänger aus der Region Waldshut ebenfalls für seine Hobbys. Zu Cha-Cha-Cha und Jive schwingt er mit seiner temperamentvollen Frau das Tanzbein, zudem spielt er Kontrabass sowie Querflöte und ist dreifacher Vater. «Als Ausgleich zum PSI», sagt der 46-Jährige zwinkernd zum Abschied und kehrt zurück zu seinen professionellen Lieblingen, den sich stetig wandelnden Atomen.

Beat Gerber

Blitzschnell die Strahlweiche stellen

Ultrakalte Neutronen: Stark heruntergekühlte und somit langsame Teilchen aus dem Atomkern, die sich speichern lassen und sich für Experimente zu grundlegenden Fragen der Physik besonders gut eignen.

Leistungselektroniker haben ein schnelles und zugleich präzises Speisegerät entwickelt, um damit den Protonenstrahl rasch umzulenken.

Für das UCN-Experiment (ultrakalte Neutronen) muss der Protonenstrahl

sehr schnell und genau zwischen zwei Strahlwegen hin- und hergeschaltet werden. Zum Umschalten wird dazu im Ablenkmagneten ein Strom von mehr als 150 Ampère (A) in weniger als einer Tausendstelsekunde geschaltet – mit einem so genannten Kicker, den Spezialisten am PSI konstruierten.

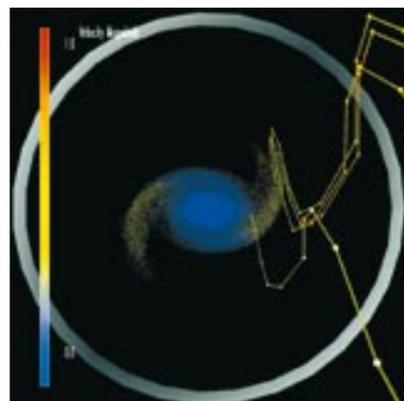
Die geforderte Genauigkeit der Umschaltgeschwindigkeit wurde bei weitem erreicht: Nach etwa 3 Millisekunden ist der Fehler kleiner als ein Promille. Wie alle neuen Speisegeräte am PSI ist auch der UCN-Kicker mit einer Regelung aufgebaut, die auf Signalprozessoren basiert. Die Auslegung der Strahlführung sowie Konzeption und Herstellung des Kickermagneten waren weitere Spitzenleistungen des PSI in diesem Projekt.



Die Leistungselektronik des Kicker-Speisegeräts.

3-D-Simulationen von Protonenstrahlen

Vergleich zwischen Modell und Messung



3-D-Reise: Ausgewählte Teilchen lassen sich mit MAD9p auf dem Weg durch den Beschleuniger verfolgen (Momentaufnahme aus Animation/A.Adelmann, PSI; C. Siegrist NERSC/LBL).

Mit den ersten Produktions-Runs des neuen Simulationsprogramms MAD9p wurde am PSI ein Meilenstein für die Handhabung hoch intensiver Teilchenstrahlen erreicht.

Das Programm basiert auf MAD9 (Methodic Accelerator Design Version 9), einem ursprünglich am CERN entwickelten Software-Paket. In einer internationalen Zusammenarbeit gelang es am PSI, die Funktionalität des Programms entscheidend zu erweitern. Die Möglichkeiten umfassen jetzt die dreidimensionale Simulation von Teilchenpaketen unter Raumladungswirkung mit Teilchenzahlen, die wirklichkeitsnah mehrere Millionen betragen.

Unter Raumladung versteht man die elektrostatische Abstossung (Coulomb-Kraft), die im Strahlpaket geladener Teilchen (z.B. Protonen) herrscht. Diese interne Wechselwirkung beeinflusst wesentlich die Strahldynamik und ist zu berücksichtigen. Das p in MAD9p steht für die Anpassung des Codes an die Besonderheiten paralleler Computer, dank denen ein Simulations-Run bloss einige Stunden statt mehrere Tage oder Wochen benötigt. Die nun am PSI möglichen direkten Vergleiche zwischen Strahlmessungen und Simulationen von hoch intensiven Protonenstrahlen stellen einen grossen Schritt dar zum besseren Verständnis der Raumladungswirkung in Teilchenstrahlen.

Rasche Reparaturen – länger in Betrieb

Zyklotron: Gerät zum Beschleunigen geladener Elementarteilchen.

Kavität: Hohlraum, in dem geladene Teilchen beschleunigt werden.

Protonenstrom: Mass für die Intensität der Protonen, wird als Strom angegeben. 2 mA (Milliampère) entsprechen rund $1,3 \cdot 10^{16}$ Protonen pro Sekunde.

Im Zentrum des Ringbeschleunigers wurde der Strahlführungsabschnitt saniert und für leistungsstärkere Kavitäten vorbereitet.

Höhere Verfügbarkeit der Anlage, kürzere Reparaturzeiten und eine geringere Strahlungs-dosis für das Servicepersonal waren die Ziele, welche die Sanierung des 30-jährigen Strahlführungsabschnitts im Zentrum des Ringbeschleunigers anstrebte. Der Aus-respektive Wiedereinbau kritischer Strahlführungs-komponenten soll in weniger als 15 Minuten möglich sein – ohne Aufenthalt in Zonen erhöhter Strahlung und ohne Belüftung des ganzen Ringzyklotrons.

Vorgenommen wurden auch notwendige Anpassungsarbeiten für den späteren Einbau leistungsstärkerer Kavitäten, um den Strahlstrom wie geplant zu erhöhen. Damit sich intensivere Neutronenstrahlen erzeugen lassen, muss der Protonenstrom aufs Produktions-target erhöht werden. Die vorhandene Anlage ermöglicht eine begrenzte Steigerung bis in den Bereich von 2 mA. Mittelfristig kann eine Stromerhöhung

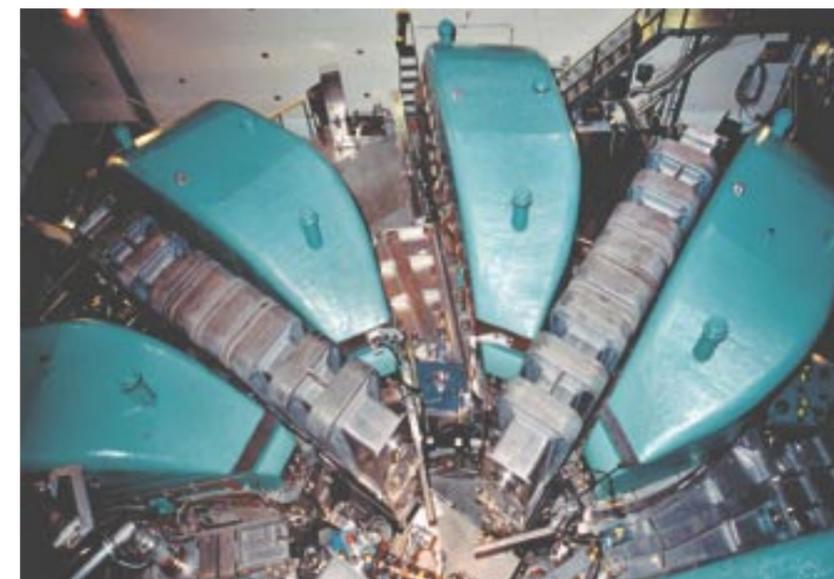
nur mit neuen, leistungsstärkeren Kavitäten erbracht werden.

Die Protonen werden im Injektorzyklotron auf 72 MeV beschleunigt, zum Ringzyklotron transportiert und gelangen via Kavität 5 und Zwischensektor 3 ins Zentrum. Dort erfolgt die Injektion auf die innerste Umlaufbahn des Ringzyklotrons, das sie auf 590 MeV beschleunigt. Der knappe Platz und inhomogene Streu- und Störfelder verlangten viele Kompromisse bei der Auslegung des Strahlabschnitts im Zentrum, auch auf Kosten der Servicefreundlichkeit und der Verfügbarkeit.

Die Sanierungsarbeiten umfassten eine neue Abstützkonstruktion und Befestigung der Strahlführung sowie einen Umbau der Ein- und Ausgangsbereiche des Strahlabschnitts mit Absperrventilen, wodurch ein unabhängiger Vakuumabschnitt entstand. Die gemeinsam auf einer Aluminiumplatte befestigten Ringeinschuss-Magnete ermöglichen den einfachen Ein- und Ausbau um die Enden der neuen Kavitäten herum und verkürzen so den Aufenthalt in Zonen starker Strahlung.



Servicefreundlich: Der Strahlführungsabschnitt im Zentrum des Beschleunigers.



Ringzyklotron mit den grünen Sektormagneten, den grauen Beschleunigungskavitäten und dem sanierten Strahlführungsabschnitt (unten Mitte).

Experiment für extreme Bedingungen

MEGAPIE: Megawatt Pilot Experiment.

LISOR: Liquid metal-Solid metal Reactions.

Target: Material, auf das bei der SINQ die Protonen gelenkt werden, um darin Neutronen freizusetzen.

Pascal: Einheit für den Druck, hergeleitet aus den SI-Einheiten Newton und Meter ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$).

Mit LISOR untersuchen PSI-Fachleute Schlüsselkomponenten, die bei der Entwicklung eines Flüssigmetall-Targets besonders heikel sind.

Im Projekt MEGAPIE wird am PSI ein Flüssigmetall-Target entwickelt, von dem man sich eine Erhöhung des Neutronenflusses gegenüber dem derzeit eingesetzten Feststoff-Target verspricht. Als Target-Material dient eine Blei-Wismut-Legierung (Pb-Bi), die bereits bei $125,5^\circ\text{C}$ schmilzt. Besonders kritisch bei MEGAPIE ist das Strahlfenster, durch das der intensive Protonenstrahl ins Blei-Wismut eindringt, um Neutronen zu erzeugen. Diese Stelle ist einer komplexen thermischen und mechanischen Belastung ausgesetzt, deren Folgen bisher nicht ausreichend erforscht sind.

Im Rahmen des LISOR-Experiments werden die verschiedenen Einflussfaktoren simuliert, die während des MEGAPIE-Betriebs das Fenstermaterial – einen speziell für diese Anwendung ausgewählten Stahl – beeinflussen.

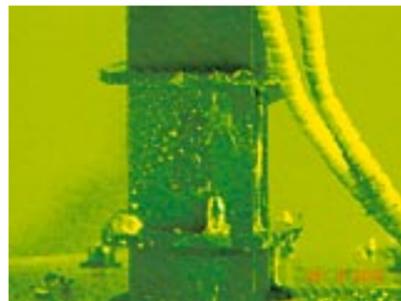
Hierzu wird erstmals das gleichzeitige Einwirken von Blei-Wismut, Protonenstrahlung und mechanischer Belastung auf das Material untersucht. Die aus einem Blei-Wismut-Kreislauf bestehende Experimentieranlage wurde Anfang 2002 am Beschleuniger installiert. Nach einer Testphase hat die Aufsichtsbehörde die Freigabe für den Strahlbetrieb erteilt.

Korrosion und Versprödung

Daraufhin ist es dem Forscherteam erstmals gelungen, einen Versuch unter Bestrahlung durchzuführen. Eine mit 200 Mega-Pascal (MPa) vorgespannte Stahlprobe (rund 40% der Streckgrenze des Materials bei Versuchstemperatur) befand sich in Kontakt mit ca. 300°C heissem, strömendem Blei-Wismut und wurde mit Protonen (72 MeV) aus einem Beschleuniger bestrahlt. Die Reaktion des Stahls mit dem Flüssigmetall unter Bestrahlung – Korrosion und Versprödung – ergab teilweise überraschende Ergebnisse, die noch zu vertiefen sind.

Während der relativ kurzen Bestrahlungszeit des ersten Experiments arbeiteten die Systeme der komplexen Experimentieranlage, wie z.B. die Kontroll- und Sicherheitseinrichtungen, fehlerfrei. Das anschließende Abtrennen der Teststrecke vom LISOR-Kreislauf gelang problemlos, ebenso die nachfolgende Demontage und Zerlegung der Teststrecke in der Hotzelle sowie der Ausbau der Probe. Aus diesem ersten Experiment erhoffen sich die Forschenden wichtige Materialdaten. Für 2003 sind weitere Bestrahlungskampagnen mit längeren Strahlzeiten vorgesehen.

Wo Blei-Wismut zirkuliert: Die Experimentieranlage LISOR.



Strahlfleck (dunkel in Bildmitte), hervorgerufen durch den Protonenbeschuss eines speziellen Stahls, der als Strahlfenster-Material dienen soll.



Protonen auf optimierten Bahnen

Um einen zuverlässigen Betrieb der neuen Bestrahlungsanlage zu gewährleisten, sind im Voraus umfangreiche Simulationen und Berechnungen erforderlich.

Im PROSCAN-Projekt soll die PSI-Anlage zur Tumorbestrahlung mit Protonen um ein zweites Behandlungsgerät und einen eigens dafür vorgesehenen Protonenbeschleuniger erweitert werden – ein 250-MeV-Zyklotron, das mit supraleitenden Spulen ausgestattet ist (siehe auch Seite 61). Physiker und Ingenieure des PSI arbeiten mit dem Hersteller ACCEL Instruments GmbH zusammen, um die Qualität des Protonenstrahls zu optimieren. Am PSI wurde eine umfangreiche Simulation durchgeführt, um die elektrischen Felder zu berechnen, die für die Beschleunigung erforderlich sind. Erstmals konnte eine derart detail-

lierte und vollständige Systemsimulation erfolgreich realisiert werden.

Die elektrischen Felder wurden danach mit dem berechneten Magnetfeld aus den supraleitenden Spulen kombiniert, um die Flugbahnen der beschleunigten Protonen zu berechnen. Kritisch ist vor allem der Extraktionsbereich, d.h. der Punkt, an dem die Teilchen aus dem Zyklotron austreten sollen. Die medizinische Verwendung der Maschine erfordert einen sehr stabilen und zuverlässigen Betrieb, der ein schnelles Eingreifen für Wartungszwecke ermöglicht. Dabei darf das Personal den aktivierten Komponenten nur minimal ausgesetzt werden. Mit der angestrebten hohen Extraktionseffizienz soll die Aktivierung minimiert werden. Um diesen Bereich optimal zu gestalten, betreiben die Fachleute einen grossen Aufwand.



250-MeV-Zyklotron für PROSCAN (mit gehobenem Deckel).

PROSCAN-Vorbereitungen

Ein Medienspektakel der besonderen Art

Um Platz für die geplante Bestrahlungsanlage und das Zyklotron zu schaffen, müssen in der NA-Halle im Areal West viele Leitungen für Kühlwasser, Strom und Gase verschoben sowie ab- und neu gebaut werden.

Umzug, teilweiser Rückbau und anschließender Neubau der Versorgungsmedien im Bereich der NA-Halle sind komplexe und heikle Aufgaben. Erschwerend für die Mitarbeiter der LOG-Sektionen Prozesskühlung und Elektroanlagen waren die hohen Anforderungen an Störungsfreiheit und der Bedarf an verschiedenen Bauprovisorien. Tatkräftig unterstützt bei Planung und Vorbereitung der diversen Arbeiten wurden die LOG-Leute durch die GFA-Abteilung Technik/Koordination/Betrieb.

Für den Weiterbetrieb der bestehenden Protonen-Gantry wurden bereits während des Beschleuniger-Betriebsunterbruchs (Shutdown 2002) Speise- und Steuergeräte, Elektronik, Vakuumbesteuerungen und vieles mehr von der Ost- zur Westgalerie versetzt, einige hundert

Kabel und Stecker gewechselt und eine provisorische Energie-Einspeisung erstellt. Damit liess sich der Abbau der Galerie, der Niederspannungsverteilung und des alten Transformators speditiv vorantreiben.

NA-Halle im Wandel: Rückbau der bestehenden Elektrochränke.



Verwertung von Wissen

Know-how- & Technologietransfer

Von Hannover bis nach China



Kontakte knüpfen zu Wirtschaft und Politik

Um auf neue Verfahren und Erkenntnisse aufmerksam zu machen, organisierte das PSI im Jahr 2002 drei Industrietage. Wiederum beteiligt war unser Institut auch am Gemeinschaftsauftritt des ETH-Bereichs an der Hannover Messe.

Die Verwertung von Wissen ist für das PSI eine bedeutende Aufgabe. Die Wirtschaft erhält damit neue Impulse, was bestehende Arbeitsplätze sichern oder neue schaffen kann. Die direkteste Wissensvermittlung ist die Ausbildung von Berufsleuten und Akademikern, die ihre Fähigkeiten danach in der Privatwirtschaft einsetzen. Besonders wichtig sind auch die Zusammenarbeit mit der Industrie in der angewandten Forschung, die gemeinsame Entwicklung neuer Produkte bis zur Marktreife, die Spin-offs aus der Grundlagenforschung und Patente. Erforderlich für den Erfolg dieser Aktivitäten ist ein dicht gewobenes Kontaktnetz, das es zu knüpfen und zu pflegen gilt.

Workshops und Seminare

Zu Themen auf den Gebieten der Nutzung von Synchrotronstrahlung, der Anwendung von Neutronen für Spannungsfeldmessungen und den Mög-



Mit Drive dabei: Das PSI präsentierte seine Forschung (u.a. den Brennstoffzellenantrieb) an der Hannover Messe 2002.

lichkeiten der Oberflächen-Technologie wurden Workshops und Seminare durchgeführt, welche die industriellen Anwender und teils auch Wissenschaftler anderer Institute als Zielgruppe anpeilten.

Mit einem Mix von externen Beiträgen und der Darstellung neuer Optionen am PSI wurde der Dialog mit möglichen Nutzern gesucht. Ein weiteres Ziel war,

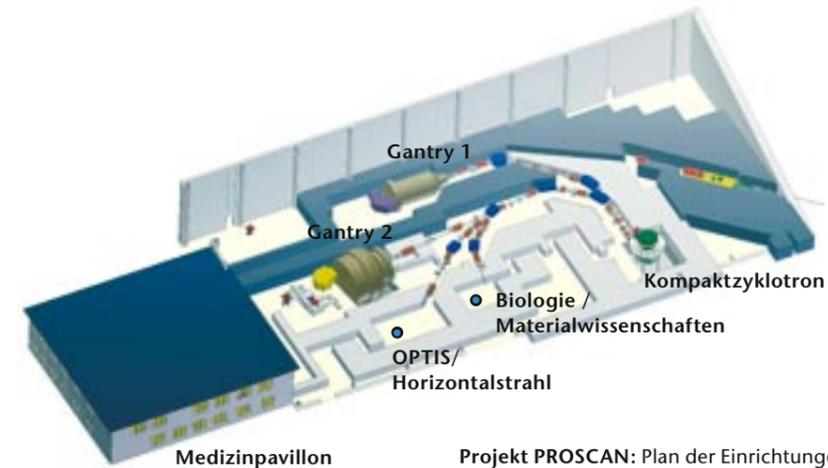
den unkomplizierten Zugang zu den Experten am PSI zu ermöglichen und auf die unbürokratische Zusammenarbeit hinzuweisen. Der direkte Kontakt und die Möglichkeit neben den Vorträgen auch die Forschungsanlagen zu besichtigen, führen häufig zu neuen Geschäftsbeziehungen.

An der Hannover Messe versuchte das PSI, die SLS als Forschungsinstrument sowie die Brennstoffzellenprojekte den Besuchern näher zu bringen, und stiess dabei auf wertvolles Interesse. Durch die Präsentation attraktiver Forschungsergebnisse bietet der Stand in Hannover immer wieder eine gute Gelegenheit, die Kontakte zu Wirtschaft und Politik zu pflegen und auszudehnen.



Im Dialog mit Nutzern: René Amstutz, Head Core Technology bei Novartis, am Industrieseminar über das Anwendungspotenzial der Synchrotronstrahlung.

Hoch wirksam und trotzdem schonend



Projekt PROSCAN: Plan der Einrichtungen.

Protonen: Elektrisch positiv geladene Elementarteilchen, die präzise steuerbar sind.

Spot-Scanning-Technik: Mit dem am PSI entwickelten Verfahren lässt sich die Strahlendosis mit grosser Präzision dreidimensional an die Form des Tumors anpassen.

Die Protonentherapie wird am PSI seit mehreren Jahren erfolgreich für die Behandlung von Krebstumoren eingesetzt.

Bis Ende des Jahres 2002 wurden über 3700 Patientinnen und Patienten mit Augentumoren bestrahlt. Die Tumorkontrollrate beträgt heute über 98 Prozent, d.h. bei mehr als 98 von 100 behandelten Patientinnen und Patienten ist seit mehr als 5 Jahren kein neues Wachstum des Tumors mehr aufgetreten. Diese Erfolge haben uns bewogen, eine neue Technik – das so genannte Spot-Scanning Verfahren – zu entwickeln. Damit lassen sich auch tief liegende Krebstumoren im Körper behandeln.

Die mit dieser Technik ausgerüstete drehbare Bestrahlungsanlage (Gantry) ist seit 1997 in Betrieb. Bis Ende 2002 wurden 129 Patientinnen und Patienten mit Tumoren im Hirn, an der Schädelbasis, im Bereich des Beckens und an der Prostata bestrahlt. Die Ergebnisse sind sehr viel versprechend. Wir sind zuversichtlich, dass wir mit unserer Behandlungsmethode für einige Tumorkategorien deutlich bessere Resultate

erzielen können als bei Anwendung der heute gebräuchlichen konventionellen Krebsbehandlung mit Photonenstrahlen. Die Protonentherapie ermöglicht es, die Krebstumoren mit der notwendigen hohen Dosis zu bestrahlen, ohne das umliegende gesunde Gewebe übermässig mit Strahlung zu belasten.

Grosses internationales Interesse

Die Entwicklungsarbeiten des PSI haben grosses internationales Interesse ausgelöst, denn es ist die erste Gantry in Europa und die erste Bestrahlungseinrichtung mit Spot-Scanning-Technik weltweit. Wir haben uns entschlossen, die Protonentherapie mit unserer Technik für den Einsatz in Spitälern weiterzuentwickeln und dazu das Projekt PROSCAN lanciert. Zusammen mit der Industrie wird ein neuartiger, sehr kompakter Protonenbeschleuniger gebaut und die Anlage erweitert (siehe auch Seite 57).

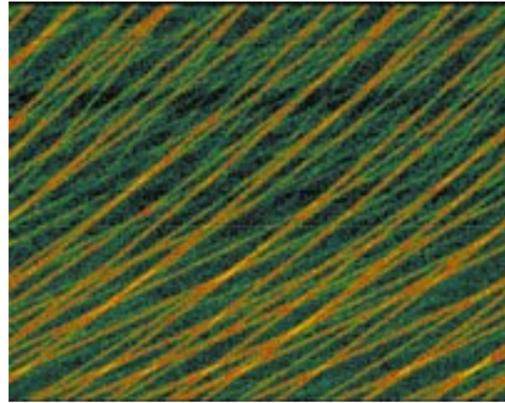
Mit Hilfe des am PSI erarbeiteten Knowhows auf dem Gebiet der Protonentherapie wird zurzeit durch unsere Industriepartner eine grosse Protonen-

therapie-Klinik in München errichtet. Sie ist die erste kommerzielle Einrichtung dieser Art in Europa und für die Behandlung von 2000 bis 4000 Patientinnen und Patienten pro Jahr konzipiert. Weitere Projekte in Europa und in Übersee sind in Planung. Durch den Know-how-Transfer fliessen Lizenzgebühren zurück ans PSI, womit das PROSCAN-Projekt und die klinischen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Protonentherapie finanziell unterstützt werden können.



Die Gantry der Protonentherapie-Anlage am PSI ermöglicht eine weltweit neuartige Bestrahlungstechnik.

Neutronen auf erhellendem Kollisionskurs



Streubild einer Stahlprobe: Aus der Lage der Linien lassen sich der Abstand der Atome in einer Richtung im Kristall berechnen und in weiteren Schritten die inneren Spannungen ermitteln.

Um die effektive Belastung eines Bauteils zu bestimmen, muss neben den von aussen verursachten Spannungen auch der innere Spannungszustand ermittelt werden. Dazu eignet sich ein spezielles Verfahren, das auf der Beugung von Neutronenstrahlen beruht.

Die Sicherheit von Bauteilen kann nur gewährleistet werden, wenn man die effektiven, lokal wirkenden mechanischen Spannungen kennt. Diese setzen sich aus den von aussen wirkenden Spannungen und den Eigenspannungen zusammen. Eigenspannungen sind im Material ständig vorhanden und entstehen sowohl bei der Herstellung, z. B. beim Schweißen, als auch während des Gebrauchs.

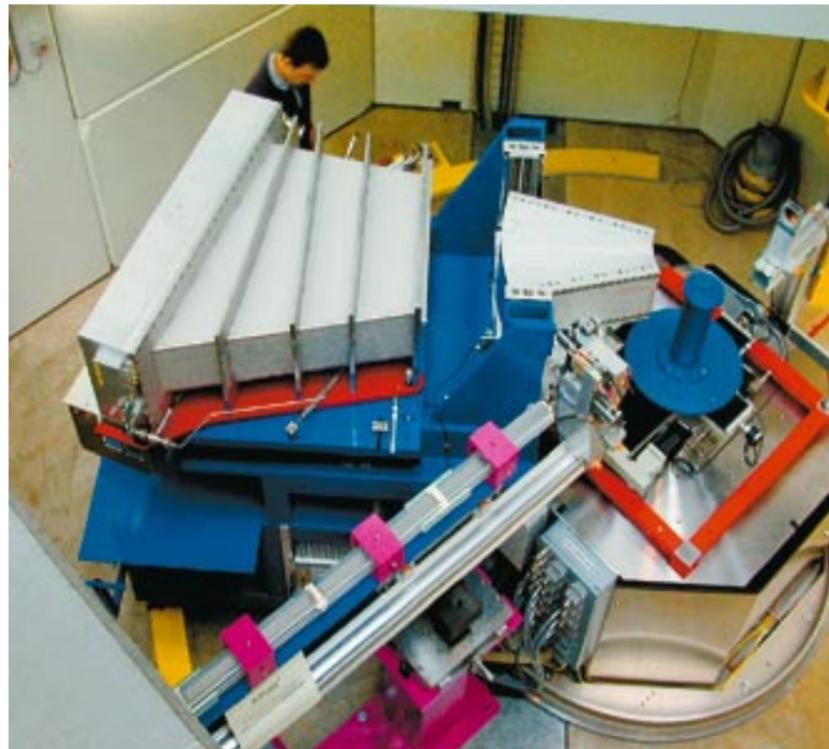
Vom Streubild zu den Spannungen

Im Gegensatz zu den äusseren Spannungen sind Eigenspannungen meist nicht von vornherein abschätzbar. Deshalb ist es wichtig, Eigenspannungen in Bauteilen zerstörungsfrei, präzise und mit guter Ortsauflösung bestimmen zu können. Eine dazu besonders gut geeignete Methode ist die Neutronenstreuung. Die ins Material eintretenden Neutronen werden von den Atomen oder Molekülen abgelenkt (gebeugt) und ergeben ein Streubild, das auf die lokale Verformung schliessen lässt. Diese Verformungen geben wiederum Aufschluss über die Spannungen.

An vielen Neutronenquellen werden zur Bestimmung von Eigenspannungen Instrumente verwendet, deren Konzept ursprünglich für andere Anwendungen gedacht war. Am PSI sind wir einen anderen Weg gegangen und haben POLDI, ein innovatives Instrument speziell für die Spannungsfeldbestimmung, entwickelt.

Das Konzept beruht auf der Flugzeitmethode, bei der man Neutronen aus einem breiten Wellenlängenbereich verwendet. Für jedes detektierte Neutron wird die Wellenlänge aus seiner Flugzeit bestimmt. Um ein ganzes Spannungsfeld zu vermessen, sind an einer Probe zahlreiche Messungen erforderlich. Sie lassen sich mit POLDI relativ schnell durchführen – in so kurzen Zeiten, wie sie sonst nur an Hochfluss-Neutronenquellen erreichbar sind.

Messraum von POLDI: Rechts im Bild ist der Probenstisch zu sehen, an dem von links unten der Neutronenleiter endet. Links oben platziert ist der Neutronendetektor, der die Teilchen nachweist.



Dem Penizillin im Steak auf der Spur

Eine Forschergruppe am PSI hat einen Biosensor entwickelt, mit dem sich auch kleinste Konzentrationen von Antibiotika nachweisen lassen.

Antibiotika werden in der Veterinärmedizin häufig zur Behandlung von Infektionen eingesetzt. In Nahrungsmitteln wie Fleisch und Milch sollen davon aber keine Rückstände mehr vorhanden sein. Um die Qualität dieser Tierprodukte sicherzustellen und missbräuchliche Anwendungen von Antibiotika nachzuweisen, sind hoch empfindliche Testverfahren erforderlich.

Antibiotika in der Milch, auch nur in geringsten Konzentrationen, verhindern deren Fermentation zu Käse und Joghurt, was einen immensen finanziellen Schaden bedeutet. Die Herausforderung besteht nun darin, Nachweisverfahren zu finden, die schnell, sensitiv und einfach zu handhaben sind. Ein Forschungsprojekt am PSI hatte deshalb zum Ziel, einen automatisierten Biosensor zum Nachweis von Penizillin-Antibiotika zu entwickeln.

Verlässlich und 100-mal besser

Ein Biosensor besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: Einem bindenden Biomolekül, das die sprichwörtliche Nadel (in unserem Fall Antibiotikamoleküle) aus dem Heuhaufen (sprich Probe) fischt und einem Detektor, der diese spezifische Bindung nachweist. Genauere Vorabklärungen ergaben, dass Penizillin innerhalb von Stunden abgebaut wird und somit die Konzentrationsbestimmungen unzuverlässig sind. Die Forschergruppe hat nun Antikörper hergestellt, die gegen ein stabiles Abbauprodukt des Penizillins gerichtet sind.

Patentiert: Kit zum Nachweis von Benzylpenizillin.

Vor einer analytischen Bestimmung werden die Antibiotika der Probe dann enzymatisch vollständig in diese stabile Abbauf orm überführt und danach immunanalytisch nachgewiesen. Dadurch lassen sich verlässliche Resultate erzielen. Mit diesem neuen, durch das PSI patentierten Verfahren wird die Nachweisgrenze überraschenderweise um bis zu 100-mal verbessert. Deshalb können die zu messenden Proben stark verdünnt und somit störende Einflüsse weitgehend ausgeschaltet werden.

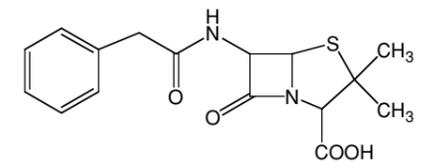
Die Biotechnologie-Firma Bioreba in Reinach BL, die selbst Testverfahren für die biochemische Analytik entwickelt und ihre Produkte weltweit vertreibt, konnte vom Vorteil des neuen immunanalytischen Verfahrens überzeugt werden. Der Transfer des Know-hows und der Schlüsselkomponenten wurde vertraglich geregelt. Nach kleineren Anpassungen steht bald ein Kit für eine breitere Evaluation zur Verfügung. Das Beispiel zeigt, wie auch Teilergebnisse eines komplexen, anwendungsorientierten Forschungsprojekts verwertet werden können.

Antibiotikum: biologischer Wirkstoff aus Stoffwechselprodukten von Kleinstlebewesen, der andere Mikroorganismen (z.B. Bakterien) im Wachstum hemmt oder abtötet.

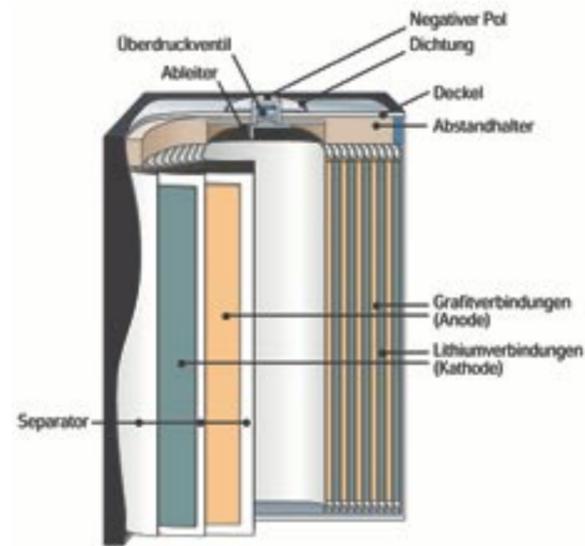
Penizillin: billiges Antibiotikum; 1928 von Alexander Fleming entdeckt.

Enzym: in der lebenden Zelle gebildetes Eiweiss, das den Stoffwechsel des Organismus steuert.

Chemische Formel von Penizillin.



Keramik zwischen den Elektroden



Lithium-Ionen-Batterie: Der Separator trennt Anode und Kathode (Bild Varta).

Zusammen mit der Industrie hat das PSI für Batterien neuartige Separatoren entwickelt, die eine erhöhte Sicherheit bieten.

In tragbaren elektrischen Geräten werden zunehmend Lithium-Ionen-Akkus eingesetzt. Wichtig für deren Sicherheit und Leistungsfähigkeit ist der verwendete Separator. Er trennt die Elektroden und

verhindert so gefährliche innere Kurzschlüsse. Zugleich nimmt er den Elektrolyten auf, eine den Strom leitende Lösung, die das Funktionieren der Batterie gewährleistet. Derzeit werden als

Separatoren Polymerfolien verwendet, die bei Temperaturen über 150 °C schmelzen können, was im schlimmsten Fall zum Brand führen kann. Neue Lösungen sind deshalb gesucht.

Am PSI wurden gemeinsam mit der deutschen Firma Degussa, Creavis Technology & Innovation, neuartige keramische Separatoren entwickelt. Sie sind unschmelzbar und sicherer als herkömmliche Produkte. Gleichzeitig weisen Batterien mit diesen Separatoren einen sehr geringen Innenwiderstand auf, was die Leistung erhöht. Auch wird die Lebensdauer der Batterie verlängert, da keramische Separatoren im Gegensatz zu solchen aus Polymeren nicht altern. Die keramischen Separatoren wurden von Degussa zum Patent angemeldet. Sie sollen in naher Zukunft in Lithium-Ionen-Batterien Verwendung finden.

Drahterosion

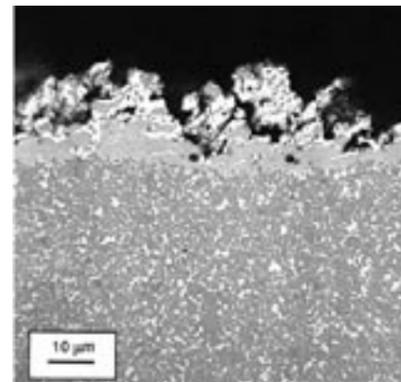
Korrosionsprobleme beim Funken Sprühen

Ein Team von Forschenden aus Hochschulen, Industrie und dem PSI untersucht die Korrosion, die eine zukunftsweisende Bearbeitungstechnologie beeinträchtigt.

Die Drahterosion ist ein viel versprechendes Verfahren, um Werkstücke im Mikro- oder Nanometer-Massstab zu bearbeiten. Eine elektrische Spannung erzeugt unzählige Funken, die langsam die gewünschte Form in das Metallstück schneiden. Um die Bearbeitungsgenauigkeit und Oberflächenqualität weiter zu verfeinern, ist eine genaue Kontrolle der Maschinenparameter erforderlich. Bei der Drahterosion in Wasser können Korrosion und Verfärbungen des Werkstückes auftreten (siehe Bild), die alle Vorteile der Methode zunichte machen.

Drahterosion in Öl würde zwar die Korrosionsprobleme vermindern oder gar vermeiden, aber die Erosion in Wasser weist mehrere Vorteile auf. Sie ist schneller, leichter zu kontrollieren und es besteht keine Brandgefahr.

Aus den genannten Gründen wurde im Rahmen des Programms Top Nano 21 im Mai 2002 ein Projekt zur Untersuchung der Korrosion bei der Drahterosion in Wasser gestartet. Mit dabei sind die Schweizer Firma AGIE SA, ein Hersteller von Erosionsmaschinen, die ETH Zürich, die Universität Bern und das PSI. Da die Korrosion häufig an Hartmetallen wie Wolframkarbid mit Kobalt auftritt, fanden die ersten Untersuchungen an diesem Material statt.



Korrosion: Die Oberfläche der Probe weist Zink- und Kupferoxide auf. Sie stammen vom zinkummantelten Messingdraht, der für die Drahterosion eingesetzt wird (Größenvergleich: 10 Tausendstelmillimeter).



Knacknüsse für Leistungselektroniker

Die SLS ist weltweit der erste Beschleuniger, bei dem die Regelung aller Magnetspeisegeräte vollständig digital realisiert ist. Die Lösung galt lange als schwer machbar. Entsprechend zeigen heute Forschung und Industrie ein grosses Interesse an unserem digitalen Regelkonzept.

Ein Blick in die Geschichte: Mit dem Konzept des grössten Speisegeräts für die Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) wurde von Beginn an ein völlig neuer Weg gewählt. Dabei tauchte auch der Wunsch auf, die Regelung auf dem modernsten Stand der Technik zu realisieren. Mit im Handel erhältlichen Test-Boards gelang es im Dezember 1998 die Projektleitung zu überzeugen, dass ein Regelkonzept, basierend auf einem Signalprozessor, mit der geforderten Präzision und Dynamik funktioniert.

Im Januar 1999 wurde mit den Spezifikationen der Prozessor- und Analog-Digital-Wandler-Hardware begonnen. Die beiden Funktionsblöcke wurden bei zwei externen Firmen fertig entwickelt und hergestellt. Mit wenigen Korrekturen konnten die Karten in der SLS einge-



Digital gesteuert und geregelt: Die Magnete der SLS.

setzt werden. Parallel zur Hardware wurde am PSI mit der Software-Entwicklung begonnen: für den digitalen Signalprozessor (DSP) und daneben auch für einen grossen, programmierbaren digitalen Baustein (FPGA).

Für mehr als 900 Geräte

Heute laufen in der SLS etwa 550 digital geregelte Geräte, einige sogar mit Multiprozessor-Systemen. Der UCN-Kicker (siehe Seite 54) verwendet die gleiche Hardware, die zukünftigen PROSCAN-Magnetspeisegeräte werden damit ausgerüstet und am Protonenbeschleuniger werden alte Geräte durch neue, digital geregelte ersetzt. Am Schluss sollen am PSI über 900 Speisegeräte mit den für die SLS entwickelten Prozessor- und Analog-Digital-Wandlerkarten laufen.

Die Flexibilität der Hardware hat den Einsatz bei weiteren Anwendungen erlaubt. Realisiert wurden ein langsam, aber konstant drehender Gleichstrom-Motorantrieb für das rotierende Target im Protonenstrahl und – als Rosine für die Leistungselektroniker – ein schnell laufender Hochleistungs-Drehstrom-Antrieb.



Herzstück für Präzision und Geschwindigkeit: die Analog-Digital-Wandlerkarte.

Schnelle Sensoren mit höchster Auflösung

Die Strahllinien der SLS liefern extrem brillantes Synchrotronlicht, das mit herkömmlichen Detektoren oft nur unzulänglich registriert werden kann. Das Problem lösen Halbleiterdetektoren mit einer am PSI entwickelten neuartigen Technologie.

Das PSI zählt auf dem Gebiet der Halbleiterdetektoren zur Weltspitze: Zurzeit entwickelt ein Team den zentralen Pixeldetektor für einen der grössten Teilchenphysik-Detektoren, den CMS-Detektor am geplanten LHC-Beschleuniger des CERN (siehe Seite 22). Die gleiche Technologie wird auch bei der SLS angewendet. Ziel des PILATUS-Projekts (Pixel Apparatus for the SLS) ist es, an der Strahllinie für Protein-Kristallografie einen ca. 40 x 40 cm² grossen Pixeldetektor aufzubauen. Bereits in Betrieb ist der MYTHEN-Detektor an der Strahllinie für Materialforschung. Das Gerät wandelt die auftreffende Synchrotronstrahlung direkt in elektrische Signale

um, die danach ausgewertet werden können.

Die Forschung profitiert von der fortschreitenden Miniaturisierung in der Mikroelektronik: Man verbindet die Pixel eines Siliziumsensors, auf dem kleine Indiumkügelchen (Durchmesser: 20 Mikrometer) sitzen, mit den Pixeln eines Auslesechips (Bump Bonding). Ein Pixel (Fläche: ca. 0,05 mm²) hat mehr als 300 Transistoren, mit denen die Signale des Sensors ausgewertet werden. Bei der jetzigen Generation von Pixeldetektoren wurden digitale Zähler implementiert, die bis zu 30'000 Röntgenstrahlen pro Belichtung in einem Pixel zählen können.

Kürzere Messzeit der Experimente

Neben verbesserter Ortsauflösung und höherem dynamischem Bereich sticht vor allem eine Eigenschaft heraus: Die Auslesezeit der Detektoren ist im Ver-

gleich zu einem kommerziellen Detektor bis zu 1000-mal kürzer. Dieser Vorteil führt einerseits dazu, dass die gesamte Messzeit der Experimente verkürzt wird, d.h. sich die zur Verfügung stehende Strahlung effizienter nutzen lässt. Andererseits erlaubt die kurze Auslesezeit auch, Experimente auf eine neue Art und Weise durchzuführen.

So ermöglicht es der schnelle PILATUS-Detektor, einen Proteinkristall bei der Messung im Strahl mit kontinuierlicher Winkelgeschwindigkeit zu drehen. Die Auslesezeit von nur 7 Millisekunden nach einer Belichtung ist so kurz, dass dafür die Drehung des Kristalls nicht angehalten werden muss. Das führt zu einer viel höheren Auflösung der Daten im Winkelraum. Die Entwicklung der Technologie in Zusammenarbeit mit Fachleuten aus verschiedenen Bereichen (SYN, TEM, LOG) ist beispielhaft für die Multidisziplinarität des PSI.



Streifendetektoren (vorne links) an einer Strahllinie der SLS. Rechts hinten sitzt die Probe, wo die Synchrotronstrahlen abgelenkt werden und danach auf die Detektoren treffen.

Pixel: Bildpunkt; kleinstes Element bei der gerasterten, digitalisierten Darstellung eines Bildes auf einem Bildschirm oder mit Hilfe eines Druckers.

Detektor: Nachweisgerät.

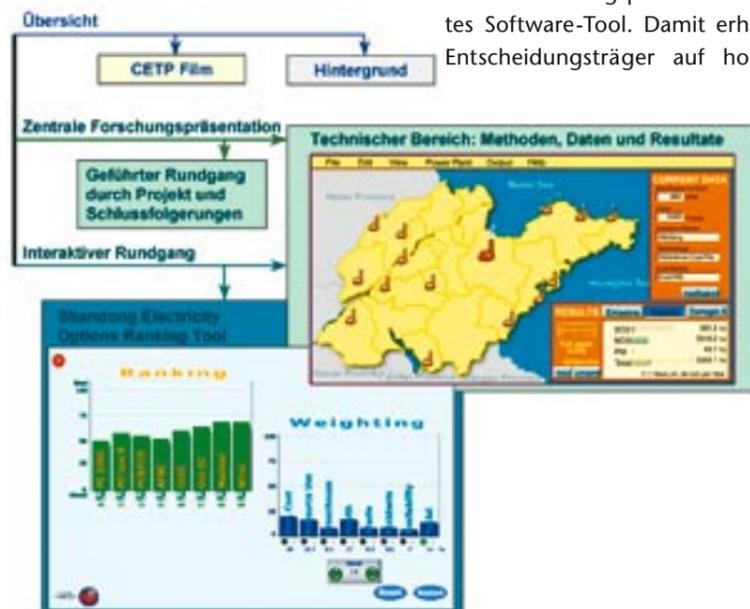
Auslesezeit: Zeit, um ein digitales Bild ins Speichermedium zu übertragen.

Moderne Technik für das Reich der Mitte



Die Luftverschmutzung in industrialisierten Gegenden ist eines der brennendsten Umweltprobleme Chinas. Fortgeschrittene Kraftwerkstechnologien könnten die Situation deutlich verbessern (Bild aus CETP-Film).

Beispiele für Entscheidungsunterstützung aus der CETP-CD/DVD: Rechts dargestellt ist die Simulation der Auswirkungen von Luftschadstoff-Emissionen aus Kraftwerken in der chinesischen Provinz Shandong: Wie vermindert sich die Sterblichkeit durch verschiedene Optionen zur Reduktion des Schadstoffausstosses? In der Grafik unten zu sehen ist die Rangfolge der Kraftwerkstechnologien, die auf einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse basiert.



Wie China eine nachhaltige Stromversorgung verwirklichen könnte, untersuchten PSI-Forscher zusammen mit internationalen Partnern. Eine vom Team produzierte CD/DVD präsentiert die vielfältigen Resultate in interaktiver und grafischer Form.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des China Energy Technology Program (CETP) durchgeführt, das die ABB in Verbindung mit der Alliance for Global Sustainability (AGS) fördert. Neben dem PSI gehörten dem Projektteam auch amerikanische (MIT), zahlreiche chinesische, japanische (Tokyo University) und schweizerische (ETHZ und EPFL) Partner an. Am Programm nahmen auch die vom Thema betroffenen chinesischen Interessenvertreter teil. Die zentrale Problematik des Forschungsprojekts war, wie sich in China eine Elektrizitätsversorgung realisieren lässt, die umweltfreundlicher und nachhaltiger ist. Die meisten Detailanalysen wurden für die östliche Küstenprovinz Shandong durchgeführt.

Das PSI-Team entwickelte im letzten Projektjahr (2002) mit Unterstützung seiner Forschungspartner ein integriertes Software-Tool. Damit erhalten die Entscheidungsträger auf hoher und

mittlerer Ebene und auch andere Benutzer (Ingenieure, Umweltexperten, Akademiker) einen flexiblen Zugang zu den CETP-Ergebnissen. Die Informationen werden auf einer CD/DVD hierarchisch dargestellt, wobei die Benutzer den Detaillierungsgrad wählen können, der ihrem Hintergrund und ihren Interessen am besten entspricht.

Abschätzungen in wenigen Sekunden

Manche Darstellungen der Ergebnisse bieten auch spezielle Möglichkeiten, wie eine erweiterte Analyse. So wurde ein Tool entwickelt, das eine interaktive Simulation der Auswirkungen von Luftschadstoffen und der entsprechenden finanziellen Schäden für verschiedene Kraftwerkstandorte erlaubt. Für jeden Standort kann der Benutzer zwischen mehreren Stromerzeugungs-Technologien wählen, die Charakteristika des Kraftwerks festlegen und Emissionsverminderungsgrade für die wichtigsten Luftschadstoffe wählen. Auf der Basis eines parametrischen Modells erfolgt die Abschätzung der Gesundheits- und Umweltschäden in wenigen Sekunden – gegenüber mehreren Stunden, welche die zu Grunde liegende Simulation im vollen Massstab benötigen würde.

Das auf mehrfachen Kriterien basierende Modul zur Entscheidungsunterstützung erzeugt und präsentiert abgestufte Ergebnisse in interaktiver, grafischer Form. Aggregierte CETP-Ergebnisse für einen Bereich von Kriterien werden mit den Benutzereingaben über Kriterienbewertungen kombiniert, um eine Abstufung von Einzeltechnologien oder einer oder mehreren Kombinationen von Einzeltechnologien herzustellen. Der Benutzer kann die besten Optionen bezüglich der Perspektiven verschiedener Interessenvertreter ermitteln, basierend auf deren wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Präferenzen.

Sauberes Kraftwerk im Kofferchen

Mobil, leise und dazu noch emissionsfrei: Das Brennstoffzellen-System PowerPac vereinigt viele Vorteile. Der tragbare Stromgenerator wurde am Paul Scherrer Institut und an der ETH Zürich entwickelt und erhielt eine begehrte Auszeichnung für Schweizer Innovationen.

Wohnwagen mit umweltfreundlicher Elektrizität, Kettensägen ohne stinkenden Dieselgenerator, Rollstühle mit effizientem Antrieb: PowerPac macht's möglich. Das Brennstoffzellen-System wandelt Wasserstoff in Wasser und Wärme um und erzeugt direkt elektrischen Strom. Konzipiert ist es für den Leistungsbereich von 500 bis 2000 Watt – zur Stromversorgung von mobilen Geräten und Kleinfahrzeugen aller Art.

In PowerPac steckt eine spezielle Technologie. Anders als bei Brennstoffzellen für Autoantriebe oder für die Wärme-Kraft-Kopplung in Heizanlagen muss das System möglichst einfach, kompakt und leicht gebaut sein. Ein Forschungsteam des PSI und der ETH Zürich arbeitete in den vergangenen zwei Jahren für PowerPac entscheidende Konzepte aus. Erprobt und patentiert wurden Innovationen beim elektrochemischen Prozess und bei der Konstruktion, wie z. B. eine integrierte Luftbefeuchtung. Das Projekt wird finanziert vom Bundesamt für Energie, der ETH Zürich und vom PSI.



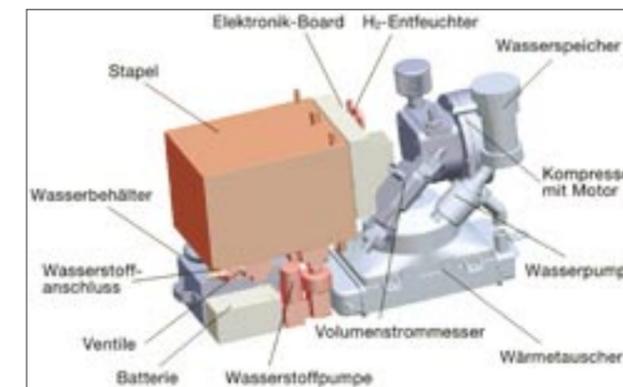
Kompakt und tragbar: Der vom PSI und der ETH Zürich entwickelte PowerPac-Stromgenerator ist ca. 60 cm lang, 35 cm hoch und 20 kg schwer (Designbild Tribecraft AG).

Produkt mit Potenzial für Weltmarkt

Den Prototypen für ein 1000-Watt-System baute das PSI-ETHZ-Team zusammen mit verschiedenen Industriepartnern auf. Von der modularen Produktreihe verspricht man sich grosse Marktchancen, weil sie mit zahlreichen Vorteilen aufwartet: einem hohen Wirkungsgrad von gegen 40 Prozent, geringem Bedarf an Wasserstoff, schnellem Auftanken und einem tiefen Geräuschpegel. Auch ökologisch ver-

mag PowerPac zu überzeugen, angesichts der globalen Klimaerwärmung ein zunehmend wichtiger Aspekt.

Im Handel wird das Produkt erst in einigen Jahren erhältlich sein. Doch für die durchdachte Schlüsseltechnologie erhielten die PowerPac-Forscher beim Swiss Technology Award 2003 einen der attraktiven Preise für Schweizer Innovationen. Das Herzstück des Kraftpakets sind Brennstoffzellen, die aus Wasserstoff praktisch schadstofffrei Elektrizität erzeugen. Entscheidend für die Umweltbilanz ist die Art, wie der Treibstoff mit fossilen Brennstoffen produziert, funktioniert PowerPac nur lokal schadstofffrei und klimaneutral. Am umweltfreundlichsten ist Wasserstoff aus erneuerbaren Ressourcen wie Sonnenenergie oder Holz. Dabei entstehen in der Energieprozesskette des Stromgenerators weder Schadstoffe noch Treibhausgase.



Blick ins Innere: Aufbau des Brennstoffzellen-Systems (Bild ZPE/ETHZ).

Das PSI als Ausbildungsstätte

Treffpunkt verschiedenster Bildungswilliger

Akademische Ausbildung

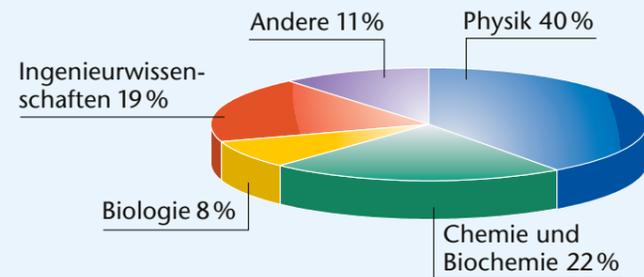
Lehrlinge

Für Mittelschulen

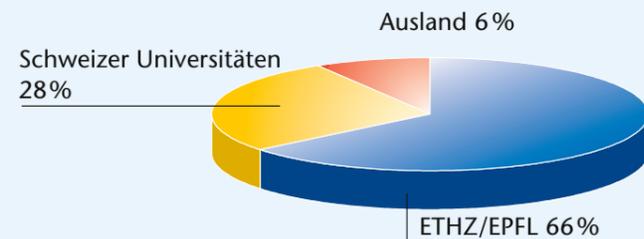
Strahlenschutz- & Reaktorschule



Attraktive Sprossen auf der Karriereleiter



Absolvierte Grundausbildung der Doktorierenden, die am PSI angestellt sind. 27 % davon sind Frauen.



Ausbildungsherkunft der Studierenden, die an den Anlagen des PSI ihre Doktorarbeit durchführen.

Zahlreiche Nachwuchskräfte in der Forschung erhalten am PSI ihre Aus- oder Weiterbildung – in enger Verbindung mit den Hochschulen.

Mehr als 240 Studierende führen an den PSI-Anlagen im Rahmen interner oder externer Forschungsgruppen ihre Doktorarbeit durch. Davon waren im Berichtsjahr 172 vom PSI finanziert. Ihre Grundausbildung absolvierten die Doktorierenden vor allem in Physik, Chemie und den Ingenieurwissenschaften. Sie kommen überwiegend von der ETH Zürich, der ETH Lausanne und den Universitäten Zürich, Bern und Basel.

Im Jahr 2002 schlossen 34 Studierende ihre Doktorarbeit am PSI ab, acht davon sind Frauen. Die Themen reichen von «Untersuchungen zur magnetischen Eindringtiefe in YBa_2Cu_3 -d-Filmen mit niederenergetischen Myonen» bis zur «Charakterisierung ausgewählter Phänomene durch elektrochemische Impedanzspektroskopie bei der Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle».

Beliebter Ort für Praktika

Auch 37 Diplomarbeiten wurden am PSI abgeschlossen, wobei die weitaus meisten Absolventen von der ETH Zürich kamen. Beliebt ist das Institut ebenfalls, um ein Praktikum zu machen. 2002 nahmen 54 Leute diese Gelegenheit wahr; drei Viertel von ihnen haben einen fremden Pass und 24% sind weiblichen Geschlechts. Am meisten Praktikantinnen und Praktikanten (wie auch Doktorierende) kann der Bereich Allgemeine Energie (ENE) verzeichnen.



Hightech-Jugend trifft Bündner Bergwelt

Das PSI mit seinen komplexen Forschungsanlagen ist auf qualifizierte Berufsleute angewiesen. Deshalb bildet das Institut zunehmend selbst solche Fachkräfte aus und betreut gegenwärtig 76 Lehrlinge. Einmal im Jahr verlassen die Jugendlichen ihren Ausbildungsplatz, um in ungewohnter Umgebung zu arbeiten.

Raus aus dem Forschungsinstitut, rein in die Bündner Bergwelt! Besser lässt sich das im September 2002 durchgeführte Lehrlingslager des PSI kaum beschreiben. An Stallneubauten in Reischen und Vaz mitarbeiten, den Zugang zur historisch wichtigen Blei- und Silbermine auf der Alp Taspegn (2200 m.ü.M.) erstellen, beim Ausbau einer Sennerei Hand anlegen, ein Geländer an einer gefährlichen Stelle der alten Viamala-Strasse montieren, einen Bauern beim Bau seines Hauses in Zillis unterstützen – die breite Palette der ausgeführten Arbeiten manifestiert die praktisch gelebte Solidarität mit der Bergbevölkerung.

Das Lehrlingslager ist jedes Jahr ein wichtiger Anlass in unserer Berufsausbildung. Es fördert die Kontakte unter den Jugendlichen, schafft Verständnis für andere Bevölkerungsschichten und bietet eine willkommene Abwechslung zum beruflichen Alltag. Mit grosser Begeisterung leisten die Lehrlinge und das Begleitteam über 2000 unentgeltliche Arbeitsstunden für die Allgemeinheit –



Kulturarbeit: Zugang zur ehemaligen Blei- und Silbermine auf der Alp Taspegn.

und gewinnen so wertvolle Erfahrungen fürs Leben, die man nicht in Schulnoten messen kann.

Ein Kommen und Gehen

Alle 19 PSI-Lehrlinge des Jahrgangs bestanden im Berichtsjahr ihre Abschlussprüfungen mit Erfolg. An einer Feier wurden sie Anfang August durch Direktor Ralph A. Eichler verabschiedet. Die einen gehen, die andern kommen: 21 Jugendliche haben 2002 ihre Lehre am PSI begonnen. Ausgebildet werden sie in den folgenden Berufen: Automatiker, Polymechaniker, Chemie- und Physikalaboranten, Elektroniker, Informatiker, Logistikassistenten und Konstrukteure. Aber auch kaufmännische Angestellte und Köche sind am PSI gefragt.



Neu im Berufsalltag: 21 Jugendliche begannen 2002 ihre Lehre am PSI.

Wo Zwerge und Riesen sich begegnen



Physik für die Jugend: PSI-Direktor Ralph Eichler demonstriert Eigenheiten von Materiestrahlen.

Fünf Maturandinnen und 13 Maturanden aus Mittelschulen der Kantone Aargau und Solothurn verbrachten eine ungewöhnliche Woche, für die sie sogar freiwillig einen Teil der Herbstferien opferten. Das Thema «Vom Kleinsten zum Grössten – Elementarteilchen- und Astrophysik» stiess bei der jungen Elite auf grosses Interesse.

Viele intelligente und begabte junge Menschen haben die Sehnsucht, in die faszinierenden Welten des Mikro- und Makrokosmos einzudringen. Schlagworte wie Quarks und Urknall finden Gehör. Manche Jugendliche wünschen sich sogar insgeheim, selbst einmal an vorderster Front der Erkenntnis mitzuwirken. Die Erforschung der innersten Zusammenhänge unseres Kosmos ist eine kulturelle Aufgabe ohne vorder-

gründigen Nutzen, und sich ihr zu stellen steht unserem Institut wohl an. Teilchen- und Astrophysik gehören denn auch zum Kerngeschäft des PSI und tragen wesentlich zu seinem Ruf in der Welt bei.

Die 9. Herbstschule vom 7. bis 11. Oktober 2002 gab der heranwachsenden Elite die Möglichkeit, einen Blick in die Forschungswelt zu werfen, wo sich kleinste und grösste Dimensionen treffen und man auch zu weiter gehenden Fragen der Kultur und Philosophie angeregt wird. Wissenschaftler des PSI haben 18 hoch motivierten Vertreterinnen und Vertretern der nächsten Generation Ideen mitgegeben, die deren berufliche Laufbahn auf verschiedene Weise beeinflussen können. Die Herbstschule leistet damit einen wertvollen Beitrag zur Zukunftsgestaltung.



Exotische Atome: Die Teilnehmenden der Herbstschule 2002 berechnen die Merkmale spezieller Teilchen.

Kein Ende des Periodensystems abzusehen



Radiochemie am PSI.

Über 40 Chemielehrer und -lehrerinnen aus Deutschschweizer Mittelschulen konnten sich am PSI zwei Tage lang über aktuelle Forschungsthemen informieren.

Wie entdeckt man neue chemische Elemente? Was erzählen uns alpine Gletscher übers Klima vergangener Zeiten? Was leisten Brennstoffzellen heute und in Zukunft? Chemieforschung hat viele Facetten – das durften 41 Lehrkräfte erfahren, die an Gymnasien in der deutschen Schweiz unterrichten. Am 11. und 12. November 2002 waren sie am PSI zu Gast und besuchten Vorträge, die SLS, das psi forum, die Strahlenschutzschule und verschiedene Labors.

Das Publikum zeigte sich interessiert an den neuesten Erkenntnissen in der Radio-, Elektro-, Solar- und Umweltchemie. Viele Fragen kreisten um das Problem, wie sich die aktuellen Befunde im Mittelschulunterricht anwenden lassen. Von der Weiterbildung profitierten beide Seiten: Die Forschenden nahmen Fühlung auf zu Praxis und Alltag, die Lehrerinnen und Lehrer wurden sensibilisiert für die Wissenschaft. Das könnte künftig mehr Maturandinnen und Maturanden dazu motivieren, ein naturwissenschaftliches Studium zu ergreifen. Eine positive Bilanz.

Zuoz-Sommerschulen

Physikalisch anziehende Wochen

Seit mehr als 30 Jahren führt das PSI jährlich Sommerschulen am Lyceum Alpinum in Zuoz durch. Mit den Themen Magnetismus und attackiertes Standardmodell gingen im Berichtsjahr zwei Kurse über die Bühne.

Die experimentellen Möglichkeiten am PSI wurden durch die Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) wesentlich erweitert. Die traditionelle Sommerschule über Neutronenstreuung wurde deshalb neu ausgerichtet, indem nun alle drei mikroskopischen Sonden des PSI zur Erforschung der kondensierten Materie (Festkörper und Flüssigkeiten) berücksichtigt werden. Vom 10. bis 17. August 2002 stand das The-

ma Magnetismus im Zentrum, das 100 Teilnehmende, meist motivierte junge Forscherinnen und Forscher aus 18 Ländern ins Engadin lockte.

In der darauf folgenden Woche trafen sich in Zuoz die Teilchenphysiker zu ihrer Sommerschule. 81 Fachleute aus aller Welt diskutierten heftig, wo sich

Diskrepanzen zum Standardmodell abzeichnen. Auch das PSI erforscht die Grenzen dieser modellhaften Beschreibung der Materie und versucht, mögliche Abweichungen zu finden – zum Beispiel Zerfallsprozesse von Myonen, die gemäss Standardmodell «nicht erlaubt» sind.



Gruppenbild aus Graubünden: Diese Sommerschüler und vereinzelter -schülerinnen hörten 2002 viel über magnetische Phänomene, Modelle und Experimente.

Radioaktive Güter sicher transportieren



Messtechnik: Wie hoch ist die Dosisleistung aus dem Versandbehälter?

Die Schule für Strahlenschutz am PSI hat sich rechtzeitig der neuen rechtlichen Situation des Bundes angepasst. Sie bietet nun auch eine Ausbildung über den Transport radioaktiver Stoffe an.

Die 2001 in Kraft gesetzte Verordnung über Gefahrgutbeauftragte für die Beförderung gefährlicher Güter auf Strasse, Schiene und Gewässer (GGBV) regelt die Aufgaben und die Ausbildung von Personen, welche die Gefahren vermindern sollen, die sich aus dem Verpacken, Laden, Befördern und Entladen gefährlicher Stoffe ergeben können. Mit dieser Verordnung kommt der Bundesrat seiner Verpflichtung aus dem Landverkehrsabkommen mit der EU nach. Jedes Unternehmen, das Gefahrgüter in gewissen Mengen befördert, musste bis Ende 2002 einen Gefahrgut-

beauftragten ernennen, der für das Einhalten der gesetzlichen Vorschriften verantwortlich ist.

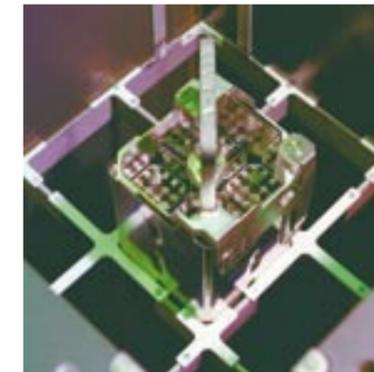
Der vorschriftsgemässe Transport von Gefahrgut setzt voraus, dass der zu transportierende Stoff vorgängig klassifiziert wurde. Von den 9 Gefahrklassen bietet unsere Schule einen fünftägigen Ausbildungskurs zur Klasse 7 «Radioaktive Stoffe» an. Vermittelt werden dabei u.a. die Grundbegriffe des Strahlenschutzes beim Transport radioaktiver Güter, die Strahlenschutz-Messtechnik, Zollformalitäten, Notfallschutz und Qualitätssicherung. Das Abschlusszeugnis, der so genannte Schulungsnachweis, ist von den Aufsichtsbehörden anerkannt und 5 Jahre gültig. Vor Ablauf dieser Frist hat der Kandidat erneut eine Prüfung zu bestehen.

Kernkraftwerkstechnik

Know-how für Operateure am Reaktor

Die Reaktorschule des PSI gewährleistet mit einem umfangreichen Lehrgangs- und Kursangebot die theoretische Grundausbildung der technischen Fachleute und die Weiterbildung des lizenzierten Betriebspersonals von Kernkraftwerken.

Die Höhere Fachschule für Technik gehört zum PSI-Forschungsbereich Nukleare Energie und Sicherheit (NES). Sie wird vom Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) finanziert und von einer Aufsichtskommission aus Vertretern der Kernkraftwerke und dem PSI kontrolliert. Weitere Aufsichtsorgane sind die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) und das Bundesamt für Berufsbildung und Technologie (BBT).



Proteus: Versuchsreaktor am PSI.

Die Schule verfügt über einen Kompakt-Simulator. Er soll reaktorphysikalische, regelungstechnische und thermodynamische Zusammenhänge für die in der Schweiz betriebenen Kernkraftwerkstypen veranschaulichen, für den Druck- und Siedewasserreaktor.

Im Januar 2002 begann der ganztägige Technikerlehrgang T-32 für angehende Reaktoroperatoren mit 17 Lehrgangsteilnehmern. Die Ausbildung findet mit den Diplomprüfungen Ende April 2003 ihren Abschluss.

Bis Ende 2002 absolvierten an der Reaktorschule in 11 Technikerlehrgängen, 21 Reaktoroperator-, 11 Reaktoringenieur- und 3 Fachingenieurkursen insgesamt 473 Personen ihre theoretische Grundausbildung in Kernkraftwerkstechnik. Zur Weiterbildung des lizenzierten Betriebspersonals wurden im gleichen Zeitraum 14 Schichtchefkurse mit 63 Absolventen, 8 Pikettingenieurkurse mit 47 Absolventen, 163 Repetitions- und 51 Wiederholungskurse mit insgesamt 1576 Teilnehmern durchgeführt.

Ereignisse 2002

Ausgewählte Highlights

Von einem geglückten Satellitenstart und dem PSI als Publikumsmagnet



Erfolgreich im Weltraum

HESSI umkreist seit dem erfolgreichen Start am 5. Februar 2002 auf rund 600 km Höhe die Erde. An Bord des Satelliten ist ein am PSI gebautes Röntgenteleskop, um damit energiereiche Sonnenaktivitäten zu beobachten.

Während drei Jahren soll der HESSI-Satellit die Sonnenemission im harten Röntgen- und Gammabereich (3 keV bis 17 MeV) messen. Diese hoch energetische Strahlung wird von Elektronen und Protonen mit vergleichbaren Energien produziert, die einer Temperatur von bis zu einer Milliarde Grad entsprechen. So hohe Teilchenenergien treten nicht in der ruhigen Sonnenatmosphäre auf, sondern werden in so genannten Flares erzeugt, d.h. in gewaltigen Eruptionen, deren Intensität und Häufigkeit in den Jahren 1999 bis 2002 das Maximum ihres 11-jährigen Zyklus durchlaufen (siehe auch Seite 21).

Besonders heftige Eruptionen führen zu verstärkten Sonnenwinden, die sich z.B. als Nordlichter bemerkbar machen können. Auch gefährden solche Ereignisse bemannte Raumstationen und Telekommunikationssatelliten. Das gewaltsame und plötzliche Auftreten höchst energetischer Teilchen wirft grundlegende astrophysikalische Fragen auf, deren Beantwortung ein Hauptanliegen der HESSI-Mission ist. Da sich auf der Erde die Bedingungen, die zu Flares führen (Plasmadichte,



Satellit HESSI misst mit seinen Instrumenten solare Eruptionen.

Temperatur etc.), nicht herstellen lassen, wird die Sonne als erdnahe Laboratorium verwendet.

Internationale Zusammenarbeit

Der High-Energy-Solar-Spectroscopic-Imager-Satellit (HESSI) wurde in internationaler Zusammenarbeit entwickelt. Beteiligt waren die University of California in Berkeley, das Goddard Space Flight Center (USA), die Firma Spectrum Astro Inc. (USA) und das Paul Scherrer Institut. Das PSI baute das Röntgentele-

skop sowie die Systeme zur Lagebestimmung bezüglich des Sonnenzentrums, inklusive den dazu notwendigen Computer.

Im Gegensatz zu sichtbarem Licht lassen sich harte Röntgen- und Gammastrahlen nicht mit herkömmlicher Optik fokussieren. Dagegen werden sie durch dichte Materie abgeschwächt, wie dies von Röntgenbildern bekannt ist. Dies nutzt die HESSI-Optik aus. Sie besteht aus 9 Paaren von Metallgittern (Kollimatoren), welche die Röntgenphotonen passieren, bevor sie in einem Röntgendetektor analysiert werden.

Das feinste Gitter hat eine Spaltbreite von 20 Mikrometern (ein Drittel der Dicke eines Haars) und muss genauer als 0,005 Millimeter mit dem 1550 Millimeter weit entfernten zweiten Gitter übereinstimmen, um präzise Messungen zu garantieren – auch noch nach den Vibrationen beim Start der Träger Rakete. Diese Aufgabe haben die PSI-Mitarbeitenden bestens gelöst.

Eine Pegasus-XL-Rakete transportiert HESSI auf die Umlaufbahn.



PSI-Technologie im Scheinwerferlicht



Nachhaltig mobil: Der VW Bora HY.POWER weckte am Autosalon in Genf das Interesse von Medien und Publikum.

Anfang 2002 konnte mit dem VW Bora HY.POWER nachgewiesen werden, dass ein Brennstoffzellenantrieb – gekoppelt mit Supercap-Speicher – auch in der Praxis funktioniert. Der für eine nachhaltige Mobilität konzipierte Prototyp wurde danach mehrmals öffentlich ausgestellt.

Nach den erfolgreichen Betriebserfahrungen bei der Überquerung des Simplonpasses im Januar kam das Fahrzeug im März nach Genf an den internationalen Automobilsalon 2002. Vor grossem Publikum wurde nicht nur die Antriebstechnik präsentiert, mit der lokal keine Emissionen anfallen. Erfahren hat die breite Öffentlichkeit auch von den Möglichkeiten, wie sich Wasserstoff auf

der Basis nachwachsender Rohstoffe erzeugen lässt. Den Genfer Auftritt ermöglicht haben die Sponsoren AMAG Schweiz und Volkswagen.

Signal am Erdgipfel

Die umweltverträgliche Mobilität war ein zentrales Thema am Erdgipfel in Johannesburg. An der prominenten Veranstaltung in Südafrika Ende August wurde auch der VW Bora HY.POWER ausgestellt (Sponsor: Volkswagen). Das silbergraue Vehikel sollte den 60'000 Teilnehmenden aufzeigen, mit welcher Technik eine solche zukünftige Mobilität funktionieren könnte.

Der VW Bora HY.POWER ist mit einem Brennstoffzellensystem ausgerüstet, das aus 6 Stapeln mit je 8 kW elektrischem Output besteht. Der Supercap-Speicher umfasst 282 Einzelzellen und kann bis 60 kW für ca. 12 Sekunden abgeben. Um den Elektromotor anzutreiben, wird die Spannung mit einem AC/DC-Wandler angepasst. Das Projekt ist eine Zusammenarbeit mit der ETH Zürich, Volkswagen, FEV Motorentechnik GmbH und montena SA, finanziell unterstützt vom Bundesamt für Energie und der AMAG Schweiz.

Prominenz am PSI-Stand: Neben Bundesrat Kaspar Villiger die damalige Genfer Regierungsrätin und heutige Schweizer Ausserministerin Micheline Calmy-Rey.



Abschied von verdienstvollem Direktor



Zehn Jahre hat Meinrad K. Eberle das PSI geleitet. Unter seiner Ägide hat sich das Institut zu einem Forschungszentrum und Benutzerlabor von Welt-rang entwickelt. Mitte 2002 trat Ralph A. Eichler seine Nachfolge an.

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verabschiedeten den langjährigen Direktor des Instituts am 19. Juni 2002 mit einer Feier. Die acht Bereiche des PSI

bedankten sich individuell bei Meinrad K. Eberle, indem sie an vier verschiedenen Stationen Überraschungen bereitstellten: humorvolle Anekdoten aus dem Forschungsalltag, ein hoch stehendes klassisches Konzert im Innenhof der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS), eine kühlende Flussfahrt vor der Einweihung des neuen Grillplatzes und das Herstellen eines Gebäcks mit revolutionären Fertigungsmethoden. Das herrliche Wetter sowie die Attraktivität und der Ideenreichtum an den einzelnen Stationen sorgten für einen unvergesslichen Tag.

Professor Meinrad K. Eberle (im oberen Bild rechts, unten ganz links) war von 1992 bis Mitte 2002 PSI-Direktor.



Baulicher Akzent auf Areal Ost

Vertreter des ETH-Rates, des Bau-centers Forschungsanstalten und die Architekten übergaben in einer kleinen Feier am 5. April 2002 den Bau dem PSI zur Nutzung.

In den 90er-Jahren zeichnete sich am PSI ein Mangel an modern ausgestatteten Laborräumen ab. Als optimale Lösung erwies sich ein Neubau auf dem Areal Ost, mit dem das Forschungslabor Ost sowie diverse ausgediente Provisorien flächenmässig kompensiert werden konnten. Zusammen mit der Sanierung des bestehenden Gebäudekomplexes liessen sich so 750 m² zusätzliche Nutzfläche bereitstellen.

Im Untergeschoss des siebenstöckigen Neubaus befinden sich Lagerräume, Haustechnikanlagen sowie Labors ohne Tageslichtbedarf. Vom Sockelgeschoss

bis zum dritten Obergeschoss wurden Trocken- und Nasslabors in unterschiedlicher Grösse eingerichtet. Das Dachgeschoss beherbergt neben den Lüftungsanlagen drei Sitzungszimmer. Die vertikale Versorgung erfolgt in den Schächten der Korridorzone, die horizontale von den Korridordecken in die



Labors hinein. Das neue Konzept (Laborversorgung von oben) ermöglicht Erweiterungen der Feinversorgung mit vergleichsweise kleinem Aufwand.

Die Ausstattung wurde einfach gehalten. Es ist den Architekten jedoch gelungen, eine sehr ansprechende Arbeitsatmosphäre zu schaffen. Beispielhaft ist auch die enge Zusammenarbeit mit den Benutzerinnen und Benutzern bei der Detailplanung.

Einweihungstrupp im modernen Treppenhäus.

Das PSI als Publikumsmagnet



Je näher wir Oberflächen betrachten, desto fremder erscheinen sie uns. Unverhofft gehorchen sie anderen physikalischen Gesetzen und ihre chemische Zusammensetzung lässt sich nur mit komplizierten Geräten bestimmen. Oberflächen bergen viele Geheimnisse und ungewohnte Perspektiven der Materie. Manchmal verändern sie ihre Eigenschaften wie ein Chamäleon seine Körperfarbe. Um seine vielfältigen Forschungsprojekte dem breiten Publikum vorzustellen, öffnete das PSI am 20. Oktober 2002 wiederum seine Türen.



Rund 5500 Menschen strömten an einem Oktobersonntag ins PSI, um die zahlreichen Experimente zum Thema «Oberflächen – vertraute und fremde Grenzen» zu besuchen. Dabei nutzen die Forschenden die Gelegenheit, das Publikum für die Wissenschaft zu begeistern.

Fachleute am PSI untersuchen Oberflächen auf verschiedene Weise. Sie verbessern Abgas-Katalysatoren, spüren Tumorzellen nach, prüfen Brennstab-hüllen, sie erkunden die atomare Zwergenwelt von Nanostrukturen, verfolgen kurzlebige Myonen-Teilchen und machen scheinbar Verborgenes sichtbar.

Gleichzeitig Eis und Dampf

Zu sehen waren erstaunliche Phänomene. Besucherinnen und Besucher konnten zum Beispiel beobachten, wie Wasser siedet und gleichzeitig zu Eis erstarrt, wie ein Supraleiter über einem Magneten schwebt und Elektronenstrahlen feiner schreiben als Menschenhaar. Der Rundgang umfasste 24 Stationen aus allen PSI-Forschungsbereichen, an denen Fachleute der Bevölkerung Red und Antwort standen.

Der Publikumsandrang an gewissen Stationen war überwältigend, die Warteschlangen erinnerten an die damals zu Ende gehende Expo.02. Rund 5500 Frauen, Männer und Kinder pilgerten an diesem sonnigen Herbsttag nach Villigen. Die Parkplätze waren völlig besetzt, auf der Aarebrücke standen die Autos Stossstange an Stossstange. Das Personalrestaurant OASE und die Cafeterias hatten Hochbetrieb: Über 900 Mahlzeiten und Tausende von Zwischenverpflegungen wurden abgegeben. Einen Besucherrekord verzeichnete auch das psi forum: 1300 Leute drängten sich in seinen Räumen.



Star unter den runden Riesen

Die Pharmakonzerne Novartis und Roche sowie die deutsche Max-Planck-Gesellschaft investieren gemeinsam in eine neue Synchrotron-Strahllinie am PSI. Das Erfolgsprojekt fand ein beachtliches Medienecho.

Im Multipack angekündigte Menschenklone, die gefälschten Forschungsergebnisse des einst gefeierten Nanophysikers Jan Hendrik Schön, ein frisch gekürter Schweizer Nobelpreisträger (ETH-Professor Kurt Wüthrich) – Sensationen, Skandale und Stars erhalten viel Aufmerksamkeit in den Medien. Oftmals zuviel.

Gegen harte Konkurrenz

Um überhaupt wahrgenommen zu werden, muss auch die Wissenschaft den Platz in der Presse und die Sendezeit bei Radio & TV erkämpfen. Gegen harte Konkurrenz aus Politik, Wirtschaft und Kultur. Bei diesem Wettbewerb um attraktive News haben laute und plakative Themen die Nase vorn. Zu kurz kommen Hintergrundberichte, die ein Problem unter verschiedenen Facetten beleuchten. Eine Möglichkeit, vertiefte Informationen zu gewinnen, bot das PSI den Journalisten im vergangenen November. Eingeladen wurde zu einer Medienkonferenz über ein Projekt, das für das Institut und auch den Forschungsplatz Schweiz wichtig ist.

Die Fakten: Die Max-Planck-Gesellschaft (MPG), Roche und Novartis wollen zusammen am PSI eine weitere Strahllinie für Protein-Kristallografie aufbauen und nutzen. Dabei beteiligt sich die MPG zur Hälfte an den Kosten, die beiden Basler Pharmakonzern steuern je 25 Prozent bei. Der finanzielle Aufwand für den Bau und einen zehnjährigen Betrieb der Strahllinie beläuft sich auf insgesamt rund 20 Millionen Franken.



Der Star: Die SLS mit der bestehenden Strahllinie für Protein-Kristallografie (Bild H. R. Bramaz).

Atomare Architektur enträtseln

Über ein Dutzend Medienschaffende folgten der Einladung ins Konferenzzimmer der SLS. Von Experten waren Vorträge zu hören über die Protein-Kristallografie, eine zukunftsweisende Methode, um die atomare Architektur von Proteinen zu enträtseln. Fast alle Medikamente wirken auf Proteine (Eiweisse). Wer also diese organischen Moleküle versteht, besitzt den Schlüssel zu hoch wirksamen neuen Arzneien.



Mit der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) hat das PSI ein wertvolles Instrument, auf dem die Zukunft entworfen wird. Es dient aber nicht nur der Pharmaindustrie, auch Materialwissenschaftler, Nano- und Energietechnik können davon profitieren.

Ein sicherer Nachrichtenwert

Die Medienkonferenz hat in Publikums- und Fachpresse zahlreiche Beiträge ausgelöst. Auch das Radio berichtete. Kein Skandal in Sicht und keine kuriose Sensation zu verkünden, und trotzdem vermochte die SLS die Medien zu interessieren, denn: Die Anlage spielte ihre Rolle mit der ihr eigenen Brillanz – als ein Star unter den runden Riesenmikroskopen. Ein sicherer Nachrichtenwert.

Das Publikum: Medienkonferenz vom 7. November 2002.

Tägliches Marketing für unser Institut

Nicht nur wissenschaftliches Publikum, auch die breite Öffentlichkeit besucht rege das PSI. Gesellschaftsrelevante Forschung, moderne Grossforschungsanlagen und das attraktive Besucherzentrum psi forum zogen im Jahr 2002 wiederum über 16'000 Personen an.

Der Tag der offenen Tür war ein grosser Publikumserfolg und ein klares Zeichen, dass sich die Bevölkerung für Forschung begeistern lässt. Dass ein grosses Interesse an Wissenschaft besteht, zeigte sich auch im Besucherdienst. Weit über 300 Gruppen besichtigten 2002 das PSI, und auch das psi forum erfreute sich mit rund 2500 Spontanbesuchern einer konstanten Beliebtheit.

Das Spektrum der Besuchergruppen war breit gefächert. Es reichte von Schulklassen sämtlicher Bildungsstufen über Firmen, Branchenverbände und Gruppen aus dem Gesundheitswesen bis hin zu Vereinen aller Art. Die Anfragen von Politik und Behörden er-

höhten sich. Die Regierungsräte des Kantons Aargau luden ihre Kollegen aus Schwyz ein und liessen sich «ihr Forschungsinstitut» zeigen. Die Präsenz Schweiz, im Auftrag des Bundes fürs Image unseres Landes werbend, kam mehrmals mit ausländischen Wirtschaftsexponenten und präsentierte das Institut als Aushängeschild des Forschungsplatzes Schweiz.

Ein wichtiger Grossanlass fand für die Gönnerschaft der Krebsliga und Krebsforschung Schweiz im November statt. Zweimal folgten 200 Personen der Einladung ans PSI, um mehr darüber zu erfahren, welche Möglichkeiten die Strahlentherapie mit Protonen bietet und wie ihre Spendengelder in der Forschung eingesetzt werden.

Massgeschneiderte Führungen

Die starke Nachfrage ist auch einem attraktiven Angebot zu verdanken. In den Bereichen Allgemeine Energie



Besuch in der Protonentherapie-Anlage von Gönnerinnen und Gönnern der Krebsliga und Krebsforschung Schweiz.

und Grossforschungsanlagen entstanden zwei neue Besucherstationen, um die Besuchenden vor Ort noch besser zu orientieren. Das PSI bietet massgeschneiderte Führungen durch qualifizierte Fachleute an. Den Gruppen ist es möglich, direkt ins Gespräch mit Forschenden zu kommen, die mit grossem Engagement und Enthusiasmus von ihrer täglichen Arbeit berichten. Die Grossanlagen können hautnah erlebt werden. Jeder Besucher wird mit seiner Skepsis und seinen Fragen ernst genommen.

Das PSI hat sich im Bewusstsein der Bevölkerung und hinsichtlich Bekanntheitsgrad in der Schweiz zunehmend etabliert. Die Realisierung eines effizienten Besucherdienstes erwies sich dabei als erfolgreiche Marketingmassnahme.



Faszination Forschung im psi forum für Jung und Alt.

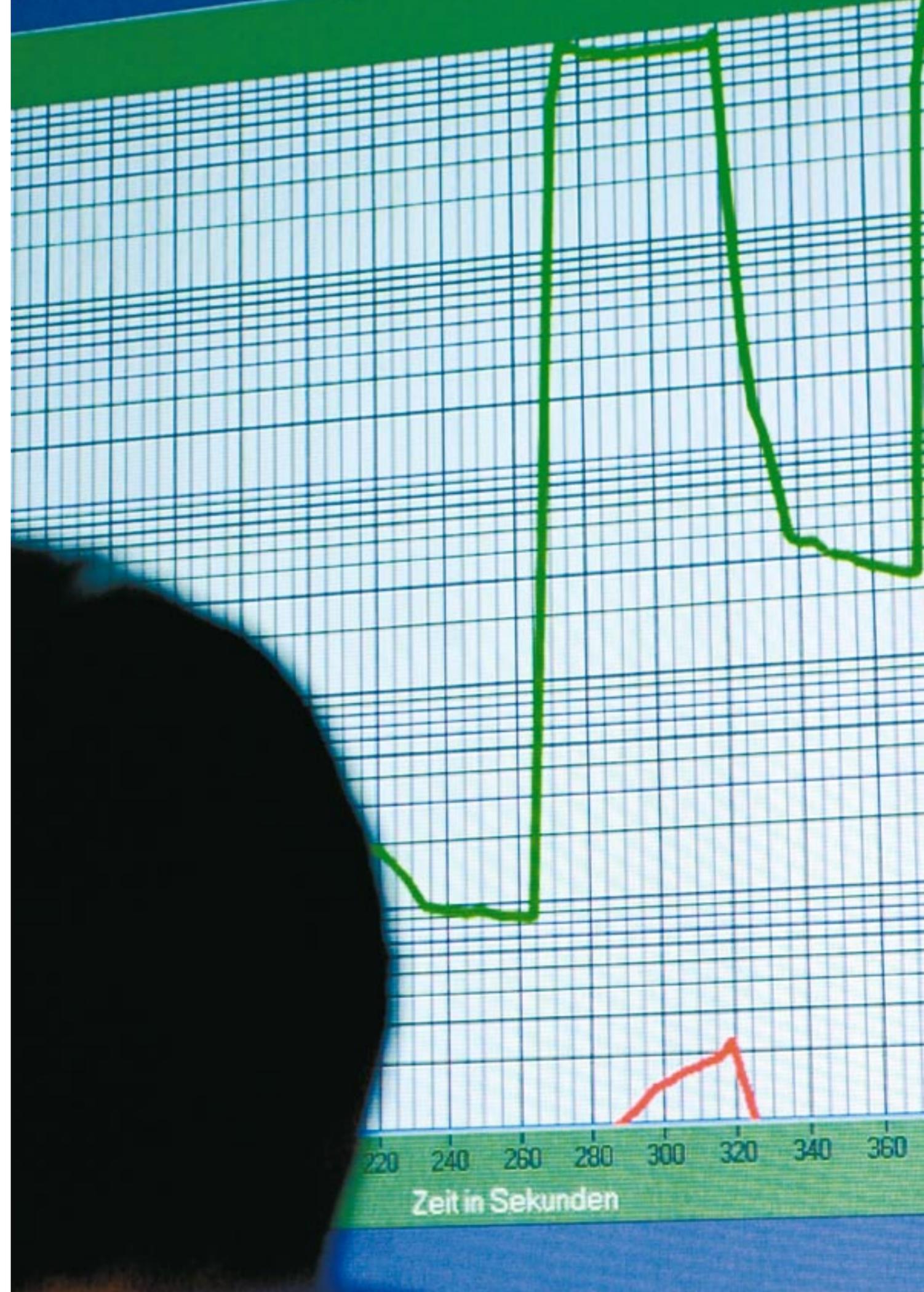
Statistik & Organisation

Zahlen & Namen

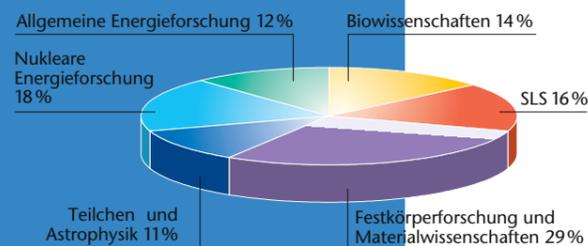
Finanzen & Personal

Organigramm

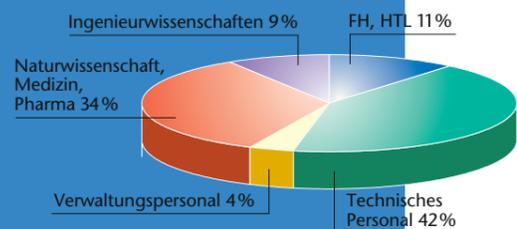
Komitees & Kommissionen



Das PSI in Zahlen

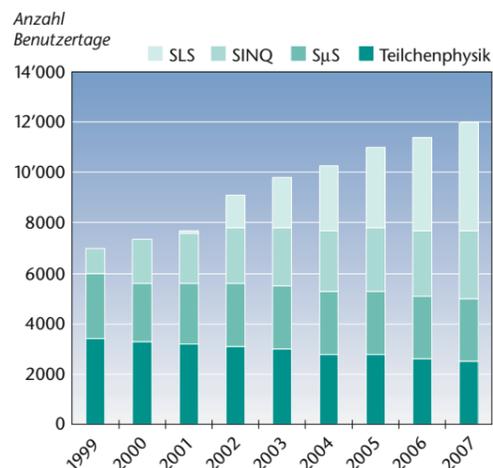


Bei der Verteilung der Gesamtmittel 2002 (inkl. Drittmittel) auf die Aufgabenschwerpunkte (Produktgruppen) des PSI sind die Forschungseinrichtungen – insbesondere Beschleunigeranlagen und SINQ – den einzelnen Schwerpunkten zugeteilt; die SLS ist separat ausgewiesen und beanspruchte 16 Prozent der Gesamtmittel des PSI (100 % = 253,8 Mio. Franken).



Die Zusammensetzung des Personals zeigt deutlich, dass das PSI eine Funktion als Benutzerlabor wahrnimmt: Die Grossanlagen und die komplexen instrumentellen Forschungseinrichtungen erfordern eine grosse Zahl an technischem Personal (100 % = 1200).

Benutzerlabor mit weltweiter Ausstrahlung: Dargestellt ist die totale Anzahl der Tage, an denen Forschende seit 1999 die PSI-Anlagen nutzten und die Prognosen bis zum Jahr 2007. Dank neuer Anlagen und Instrumente sowie der Optimierung der bisherigen ist die Zunahme der Benutzertage beträchtlich.



Für Forschung und Entwicklung, für Bau und Betrieb der Forschungsanlagen und der übrigen Infrastruktur sowie für Dienstleistungen wandte das PSI im Berichtsjahr 253,8 Mio. Franken auf. Der Bund leistete dazu einen Finanzierungsbeitrag von 216,6 Mio. Franken. Das sind 11,7 Mio. Franken weniger als im Jahr 2001, wobei diesmal die Zahlungstranche für die SLS von 10 Mio. Franken wegfiel.

Die Drittmittel flossen auch im Jahr 2002 zu 60 Prozent aus der Privatwirtschaft und zu mehr als einem Viertel aus Forschungsförderungs-Programmen des Bundes (Schweizerischer Nationalfonds, Bundesamt für Energie). 12 Prozent der Drittmittel waren mit EU-Programmen verbunden. Von den PSI-Gesamtmitteln wurden 52,5 Mio. Franken (20 %) für Investitionen eingesetzt; 149,4 Mio. Franken (59 %) betrugten die Personalkosten.

Drei Viertel des Aufwands für Benutzerlabor

Ca. 75 Prozent des Gesamtaufwandes kamen im Jahr 2002 der Benutzerlabor-Funktion des PSI zugute. Die hohen Anforderungen für die vorwiegend externe Benutzerschaft führen zu einer starken Einschränkung der PSI-eigenen Forschung. Besonders betroffen davon sind Forschungsthemen, die nur beschränkt mit der Benutzerlabor-Funktion des PSI zu tun haben. Die externen Benutzerinnen und Benutzer unserer Forschungseinrichtungen lassen sich aber nur optimal betreuen und unterstützen, wenn die PSI-eigene Forschung an den Anlagen genügend kompetent und attraktiv betrieben werden kann.

Insgesamt waren Ende 2002 am PSI rund 1200 Personen beschäftigt, wovon die weitaus meisten (77 %) im Kanton Aargau wohnen, vor dem Kanton Zürich (12 %) und dem Ausland (7 %). 12 Prozent des Personals sind Frauen und knapp 40 Prozent haben einen ausländischen Pass. Mehr als 240 Doktorierende leisteten im Berichtsjahr ihre Promotionsarbeit ganz oder teilweise am PSI. Davon waren 172 vom PSI finanziert (siehe Seite 72). Die Doktorandinnen und Doktoranden profitieren auch von den am PSI bereitgestellten Forschungseinrichtungen und werden von PSI-Mitarbeitenden betreut und unterstützt. Am PSI standen zudem 76 Lehrlinge in der Berufsausbildung.

Organigramm für das Paul Scherrer Institut (ab 1. August 2002)



Forschungskomitees

Forschung mit Synchrotronstrahlung (SYN)

Scientific Advisory Committee (SAC)

Prof. Dr. M. Altarelli, Präsident	Sincrotrone Trieste, Trieste, IT
Prof. Dr. Y. Baer	Université de Neuchâtel, CH
Prof. Dr. K. Brändén	Microbiologie & Tumorbologie Center, Stockholm, S
Prof. Dr. W. Eberhardt	BESSY GmbH, Berlin, DE
Prof. Dr. J. Hastings	SSRL/SLAC, Stanford, USA
Prof. Dr. G. Margaritondo	ETH Lausanne, CH
Prof. Dr. G. Materlik	Diamond Project, Oxfordshire, UK
Prof. Dr. Dr. h.c. mult. K. A. Müller	Hedingen, CH
Prof. Dr. T. Richmond	ETH Zürich, CH

Festkörperforschung mit Neutronen und Myonen (NUM)

Wissenschaftlicher Ausschuss SINQ

Prof. Dr. P. Schurtenberger, Präsident	Universität Fribourg, CH
Prof. Dr. P. Böni	Technische Universität München, DE
Prof. Dr. P. Fratzl	Erich-Schmid-Institut, Leoben, AT
Prof. Dr. D. Kearley	Technical University Delft, NL
Dr. L. McCusker	ETH Zürich, CH
Dr. D. McMorrow	Risø National Laboratory, Roskilde, DK
Prof. Dr. J. Skov-Pedersen	Universität Aarhus, DK
Prof. Dr. W. Press	Institut Laue Langevin, Grenoble, FR
Dr. C. Wilson	ISIS Facility, RAL, Rutherford, GB
Prof. Dr. H. Zabel	Universität Bochum, DE

Myonspin-Spektroskopie

Prof. Dr. H. Keller, Präsident	Universität Zürich, CH
Prof. Dr. A. Baldereschi	ETH Lausanne, CH
Dr. M. Fähnle	MPI, Stuttgart, DE
Dr. P. Fischer	PSI/ETH Zürich, CH
Prof. Dr. E. M. Forgan	University of Birmingham, UK
Prof. Dr. J.J.M. Franse	Van der Waals-Zeeman Lab, Amsterdam, NL
Prof. Dr. F. J. Litterst	IMNF, TU Braunschweig, DE
Prof. Dr. P.W. Percival	Simon Fraser University, Burnaby, CDN
Dr. F. Pratt	RIKEN-RAL / Oxford University, UK

Teilchen und Materie (TEM)

Teilchenphysik-Experimente

Prof. Dr. C. Hoffman, Präsident	LAMPF, Los Alamos, USA
Prof. Dr. A. Blondel	Universität Genf, CH
Dr. D. Bryman	TRIUMF, Vancouver, CDN
Prof. Dr. M. Pendlebury	University of Sussex, UK
Prof. Dr. L. Tauscher	Universität Basel, CH
Prof. Dr. G.J. Wagner	Universität Tübingen, DE
Prof. Dr. D. Wylter	Universität Zürich, CH

Biowissenschaften (BIO)

Prof. Dr. B. Hirt, Präsident	ISREC, Epalinges, CH
Prof. Dr. H.H. Coenen	Forschungszentrum Jülich, DE
Prof. Dr. Ch. Glanzmann	Universitätsspital Zürich, CH
Prof. Dr. U. Haberkorn	Universitätsklinikum Heidelberg, DE
Prof. Dr. J.A. Hubbell	ETH Zürich und Universität Zürich, CH
Prof. Dr. D. Moras	UPR de Biologie Structurale IGBMC, Illkirch-Strasbourg, FR

Nukleare Energie und Sicherheit (NES)

Dr. Ch. McCombie, Präsident	Gipf-Oberfrick, CH
Dr. H. Fuchs	ATEL, Olten, CH
Prof. Dr. M. Giot	Université Catholique de Louvain, BE
Dr. U. Schmockler	HSK, Würenlingen, CH
M. Schönenberger	Kernkraftwerk Leibstadt AG, CH
Dr. J. B. Thomas	CEA-Saclay, Gif-sur-Yvette, FR
Prof. Dr. K. Törrönen	Institute of Energy, Petten, NL
Dr. P. Zuidema	NAGRA, Wettingen, CH

Allgemeine Energie (ENE)

Prof. Dr. A. Zehnder, Präsident	EAWAG, Dübendorf, CH
Dr. P. Jansohn	Alstom Power, Dättwil, CH
Prof. Dr. T. Peter	ETH Zürich, CH
Prof. Dr. A. Reller	Universität Augsburg, DE
Dr. M. Schaub	CT Umwelttechnik AG, Winterthur, CH
H.U. Schärer	BFE, Bern, CH
Prof. Dr. L. Schlapbach	EMPA, Dübendorf, CH
Prof. Dr. A. Voss	Universität Stuttgart, DE

Beratende Kommission

Prof. Dr. P. Martinoli, Präsident	Institut de Physique, Université de Neuchâtel
Dr. S. Bieri	Delegierter und Vizepräsident des ETH-Rats
Prof. Dr. S. Catsicas	Vizepräsident für Forschung, ETH Lausanne
Prof. Dr. E. Jaeschke	Direktor, BESSY GmbH, Berlin
Prof. Dr. K. Müller	F. Hoffmann-La Roche AG, Basel
Dr. H. Neukomm	Leiter Stabsdienst Forschung, ETH-Rat
Dipl. Ing. J.-L. Pfaeffli	SA l'Energie de l'Ouest-Suisse, Lausanne
Dr. iur. M. Reimann	Ständerat, Gipf-Oberfrick
Dipl. Ing. O.K. Ronner	Präsident, Siemens Building Technologies AG, Zürich
Dr. W. Steinmann	Direktor, Bundesamt für Energie, Bern
Prof. Dr. U. W. Suter	Vizepräsident für Forschung und Wissenschaftsbeziehungen, ETH Zürich
Dr. P. Zinsli	Stellvertretender Direktor, Bundesamt für Bildung und Wissenschaft, Bern
Prof. Dr. R. Eichler	Direktor, Paul Scherrer Institut
Dipl. Phys. M. Jermann, Sekretär	Stabschef Direktion, Paul Scherrer Institut

PSI-Forschungskommission

Externe Mitglieder

Prof. Dr. H.-R. Ott, Präsident	Labor für Festkörperphysik, ETH Zürich, CH
Prof. Dr. U. Amaldi	University of Milano Bicocca, Mailand, IT
Dr. B. Barré	COGEMA, Vélizy, FR
Prof. Dr. W. Baumeister	Max-Planck-Institut für Biochemie, Martinsried b. München, DE
Prof. Dr. Ø. Fischer	Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, CH
Prof. Dr. B. Johannsen	Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie, Rossendorf, DE
Dr. D.E. Moncton	Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, Argonne, USA
Prof. Dr. D. Richter	Institut für Neutronenstreuung am Institut für Festkörperforschung, Jülich, DE
Prof. Dr. J.W. Tester	Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA
Prof. Dr. U. Wagner	Energiewirtschaft und Anwendungs- technik, TU München, DE
Prof. Dr. P. Zerwas	DESY, Hamburg, DE

Interne Mitglieder

Prof. Dr. K. Ballmer	Biowissenschaften (BIO)
Dr. B. Delley	Festkörperforschung mit Neutronen und Myonen (NUM)
Dr. J. Hadermann	Nukleare Energie und Sicherheit (NES)
Dr. R. Henneck	Teilchen und Materie (TEM)
Dr. P. Hosemann	Nukleare Energie und Sicherheit (NES)
Dr. G. G. Scherer	Allgemeine Energieforschung (ENE)
Dr. N. Schlumpf	Teilchen und Materie (TEM)
Dr. L. Simons	Teilchen und Materie (TEM)
Dr. U. Staub	Forschung mit Synchrotronstrahlung (SYN)
Dr. W. Wagner	Festkörperforschung mit Neutronen und Myonen (NUM)
Dr. P. Hasler, Sekretär	Biowissenschaften (BIO)

Ständiger Gast (Präsident Forschungskommission ETHZ)

Prof. Dr. A. Green	Institut für Geophysik, ETH Zürich, CH
--------------------	--



PAUL SCHERRER INSTITUT



Paul Scherrer Institut
CH-5232 Villigen PSI
Internet

Telefon 056 310 21 11
Telefax 056 310 21 99
<http://www.psi.ch>