

Zeitschrift: Mitteilungen der aargauischen Naturforschenden Gesellschaft
Herausgeber: Aargauische Naturforschende Gesellschaft
Band: 37 (2011)

Artikel: Das Paul Scherrer Institut : Spitzenforschung im Aargau
Autor: Gassmann, Fritz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-283433>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



Fritz Gassmann:
Das Paul Scherrer Institut –
Spitzenforschung im Aargau

The Paul Scherrer Institute –
Cutting-Edge Research in Canton Aargau

PSI is Switzerland's largest research center for natural and engineering sciences covering solid state physics, material sciences, biomedicine, energy, and environmental sciences. It develops large scale and unique research facilities which are operated as user-labs, attracting yearly more than 2000 scientists from all over the world. With its yearly budget of 300 million Swiss francs, it occupies 1400 persons, not including 300 doctorands and 80 apprenticeships. We describe the three large facilities: the synchrotron light source SLS, producing brilliant light in the spectral range from infrared to x-ray; the large flux proton cyclotron producing intensive myon- and neutron beams; and the proton therapy facility for curing cancerogenic tumors. To give an idea of the research areas covered by PSI, we present several projects in the fields of *man and health* (protein structure analysis, phase-contrast x-ray pictures, x-ray tomography), *energy and environment* (solar furnace, fuel-cells, gas from wood, aerosol research, nuclear energy), *material sciences and nanotechnology* (use of neutrons and myons, neutron radiography, superconductors, imaging of magnetic patterns), and *elementary particles* (CMS-detector for CERN, proton radius). We focus on the education and communication concept of PSI, on PSI as competence and innovation center and conclude with a look into the future: the ongoing development of the x-ray free electron laser SwissFEL and the planned hightech zone for spinoff firms and other users of PSI's facilities.

1. Das Paul Scherrer Institut PSI

Das 1988 gegründete Paul Scherrer Institut PSI (Abb. 1) ist das grösste Forschungszentrum für Natur- und Ingenieurwissenschaften der Schweiz. Seine zukunftsgerichteten Forschungsgebiete sind Festkörperphysik, Materialwissenschaften, Medizin, Teilchen- und Beschleunigerphysik, Energie und Umweltwissenschaften. Es entwickelt, baut und betreibt zudem komplexe Grossforschungsanlagen, die jährlich mehr als 2000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler anziehen. Diese kommen aus der Schweiz und der ganzen Welt ans PSI, um an den einzigartigen Anlagen Experimente durchzuführen, die so woanders nicht möglich sind. Das PSI beschäftigt rund 1400 Personen. Dazu kommen noch 300 Doktorandinnen und Doktoranden sowie 80 Lernende in 13 Berufen. Ein Drittel des Personals sind Forschende, die Übrigen sind Fachleute in verschiedenen technischen und administrativen Berufen. 22% aller Mitarbeitenden sind Frauen, 42% sind Ausländer. Das jährliche Budget von rund 300 Millionen Franken wird zum grössten Teil von der Schweizerischen Eidgenossenschaft getragen. Das PSI ist Teil des ETH-Bereichs, dem auch die ETH Zürich und die ETH Lausanne angehören sowie die Forschungsinstitute Empa (Materialwissenschaften und Technologieentwicklung in Dübendorf), Eawag (Wasserforschung in Dübendorf) und WSL (Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in Birmensdorf). Das Institut befindet sich im Kanton Aargau auf

Wird es einmal möglich sein

- ▶ mit Sonnenenergie Auto zu fahren?
- ▶ unabhängig zu sein von Ölimporten?
- ▶ Produkte mit viel kleinerem Energieaufwand herzustellen?
- ▶ Strom verlustfrei zu transportieren?
- ▶ Alles Geschriebene der Welt auf einem einzigen Chip zu speichern?
- ▶ einzelne Moleküle zu fotografieren?
- ▶ bei einer chemischen Reaktion zuzuschauen?
- ▶ Krebs, Osteoporose und Alzheimer zu heilen?
- ▶ individuell angepasste Medikamente zu erhalten?
- ▶ Elementarteilchen und Kosmos besser zu verstehen?

Das PSI sucht nach Antworten.

Natur im Aargau 2011 – Jubiläumsband

Fritz Gassmann:

Das Paul Scherrer Institut – Spitzenforschung im Aargau



Abb. 1: Luftaufnahme des Paul Scherrer Instituts PSI. Westlich der Aare (unten, Gemeindegebiet Villigen) befinden sich die grossen Beschleunigeranlagen. Östlich der Aare (oben, Gemeindegebiet Würenlingen) sind die Energieforschung sowie die Bio-, Material- und Umweltwissenschaften konzentriert. Foto: PSI.

dem Gebiet der Gemeinden Villigen und Würenlingen, auf beiden Seiten der Aare.

Die Forschenden am PSI erarbeiten jährlich gegen 1000 Publikationen, viele davon erscheinen in den renommiertesten wissenschaftlichen Zeitschriften wie *Nature*, *Science*, *Cell* oder *Physical Review Letters*. Das PSI trägt zur Qualifikation der zukünftigen Generationen bei, indem es sowohl Berufsleute als auch Studierende und Doktorierende ausbildet. Als Beitrag zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses betreibt es das Schülerlabor iLab, wo Jugendliche erleben können, dass Natur- und Ingenieurwissenschaften interessant und zukunfts-trächtig sind.

Wer war Paul Scherrer?

Der Namensgeber des Instituts, Paul Scherrer (1890-1969, Abb. 2) aus Herisau, immatrikulierte sich 1908 an der ETH Zürich, um Botanik zu studieren. Nach zwei Semestern wechselte er jedoch zu Mathematik und Physik. Nach einem Semester an der Universität Königsberg promovierte er an der Universität Göttingen über die Drehung der Polarisationsebene von Licht in einem Magnetfeld (Faraday-Effekt). 1916, noch während seiner Dissertation, entwickelte er zusammen mit seinem Lehrer Peter Debye die bekannte "Debye-Scherrer-Pulvermethode", ein Verfahren zur Strukturanalyse von Kristallen mittels Rönt-

genstrahlen. Er leistete damit einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung von Streuverfahren, wie sie heute noch an den Grossanlagen des PSI eingesetzt werden. Debye erhielt dafür 1936 den Nobelpreis für Chemie.

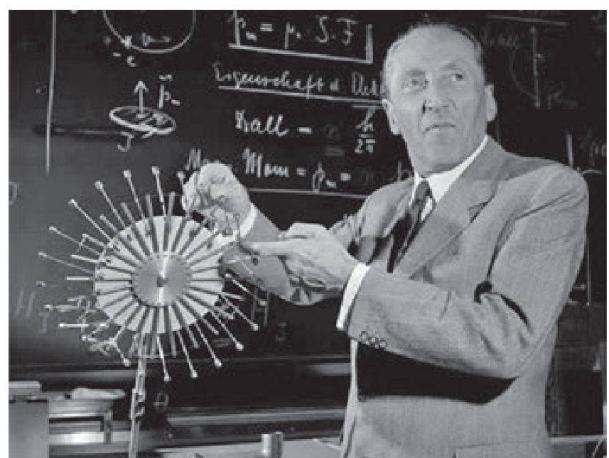


Abb. 2: Physikprofessor Paul Scherrer, um 1955. Foto: Bildarchiv ETH-Bibliothek Zürich.

1920 ernannte die ETH Zürich den erst 30-jährigen Scherrer zum Professor für Experimentalphysik. 1925 organisierte er den ersten internationalen Physikerkongress nach dem ersten Weltkrieg. Als Vorsteher des Physikalischen Instituts der ETH Zürich fokussierte er dessen Ausrichtung auf die Kernphysik, ein Forschungszweig, der damals erst entstand. Unter seiner Federführung wurde 1940 der erste Zyklotron-Teilchenbeschleuniger an der ETH Zürich gebaut. Zudem war er 1954 an der Gründung des CERN bei Genf beteiligt und ein Jahr später an denjenigen der Reaktor AG in Würenlingen zur Entwicklung eines Schweizer Kernreaktors zur Stromerzeugung. Als Paul Scherrer 1960 nach 40 Berufsjahren emeritiert wurde, nahm er einen Lehrauftrag an der Universität Basel an. 1969 verstarb er an den Folgen eines Reitunfalls.

2. Die Grossforschungsanlagen des PSI

2.1 Benutzerlabor für Forschung und Industrie

Elementarteilchen wie Photonen aus Synchrotronlicht, Neutronen oder Myonen sind für Forschende vieler Disziplinen äusserst interessant. Mit diesen Elementarteilchen als "Sonden" lässt sich der Aufbau von Kristallen entschlüsseln, sie helfen beim Verständnis magnetischer Vorgänge oder bei der Aufklärung der Strukturen biologischer Moleküle. Da diese Sonden jedoch nur mit grossem Aufwand hergestellt werden können, besitzen die meisten Forschergruppen an Hochschulen und in der Industrie keine Synchrotronlicht-, Neutronen- oder Myonenquellen. Das PSI stellt deshalb seine Grossanlagen auch externen Benutzern zur Verfügung. Dies sind jährlich rund 2000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der Schweiz (45%), aus dem EU-Raum (50%) und aus den USA sowie dem asiatischen Raum (5%). In den Betrieb, den Unterhalt und die Weiterentwicklung dieser Grossforschungsanlagen sowie in die Betreuung und Unterstützung der Forschenden der Schweizer Hochschulen investiert das PSI jährlich rund ein Fünftel seines Jahresbudgets. Die Messzeit ist am PSI für alle akademischen Forschenden kostenlos – genauso wie Schweizer Wissenschaftler auch kostenlos an den Einrichtungen in anderen Ländern forschen können. Nutzer aus der Industrie hingegen können Strahlzeit kaufen und so die Anlagen des PSI für ihre angewandte Forschung verwenden. Da die Nachfrage nach Strahlzeit das Angebot deutlich übertrifft, bewertet ein mit internationalen Fachleuten besetztes Komitee die wissenschaftliche Qualität der Messzeitanträge und empfiehlt dem PSI, an welche Projekte tatsächlich Messzeit vergeben werden soll. Rund ein Drittel bis über die Hälfte der Anträge muss dabei abgelehnt werden. Der Erfolg eines Benutzerzentrums zeigt sich vor allem am Interesse der Forschergemeinde, sowie in der Zahl von Veröffentlichungen, die auf den durchgeführten Experimenten beruhen. So erschei-

nen jedes Jahr rund 400 Fachartikel, die auf Experimenten an den Grossanlagen des PSI beruhen. Sehr prominent erschien die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS in der Wissenschaftswelt im Jahr 2009: Der Nobelpreisträger Venkatraman Ramakrishnan von der Universität Cambridge (UK) hat wesentliche Messungen, die zum prestigeträchtigen Preis führten, an einer Protein-Strukturanalyse-Strahllinie der SLS durchgeführt. Nachfolgend werden die Grossforschungsanlagen des PSI vorgestellt, nämlich die Synchrotronlichtquelle, der Protonenbeschleuniger und die Anlage zur Protonentherapie. In erster Linie wird hier auf deren grundsätzliche Funktionsweise eingegangen. Für konkrete Projekte an diesen Anlagen sei auf Abschnitt 3 verwiesen.

2.2 Die hochbrillante Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS

Die SLS (Abb. 3) wurde 2001 in Betrieb gesetzt. Die gegen 1000 Experimente, die jährlich durchgeführt werden, betreffen die Physik, Chemie, Biologie, sowie die Umwelt- und Geowissenschaften. Wegen der grossen Nachfrage wurde sie stetig erweitert: Die anfänglich 4 Strahllinien (Experimentierplätze) wurden unterdessen auf 18 ausgebaut. Trotz dieser enormen Vergrösserung der Kapazität übersteigt die Nachfrage das Angebot mehrfach, denn gut zwei Drittel aller externen Nutzer von PSI-Grossanlagen experimentieren an der SLS.

Funktionsweise der SLS

Das Herz der Anlage (Abb. 4) ist ein Synchrotron-Beschleuniger für Elektronen. Bis zu dreimal pro Sekunde gibt eine Elektronenkanone ein kleines Elektronenpaket in den ringförmigen



Abb. 3: Das SLS-Gebäude mit über 100 m Durchmesser. Im roten Gebäude rechts ist das Kontrollzentrum untergebracht. Foto: PSI.

Synchrotron-Beschleuniger ab. Ein solches Elektronenpaket hat den Durchmesser eines menschlichen Haars (ca. 80 µm), eine Länge von 2 cm und enthält rund 100 Millionen Elektronen. Im Synchrotron-Beschleuniger wird es mit hunderten von Magneten auf einer kreisförmigen Bahn gehalten und durch Mikrowellenfelder in sogenannten Kavitäten (siehe Kasten) auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Zusätzlich sind viele magnetische Linsen in den Strahlgang eingebaut (Abb. 5). Analog wie Lichtstrahlen durch eine Gläserlinse auf deren Brennpunkt fokussiert werden, komprimieren diese magnetischen Linsen die Elektronenpakete in Längs- und Querrichtung. Dies ist wichtig, weil sich Elektronen gegenseitig abstoßen und sich deshalb sehr schnell voneinander entfernen.

Was sind Kavitäten?

Kavitäten sind vergleichbar mit Mikrowellengeräten. In einem Küchen-Mikrowellengerät drehen elektromagnetische Wechselfelder polare Moleküle (vorwiegend Wassermoleküle) in jeder Sekunde rund 2.5 Milliarden mal um ihre Achse. Diese Bewegungen werden durch Stöße an alle anderen Moleküle der zu erwärmenden Speise weitergegeben: Wärme ist Bewegung der Atome; je schneller diese ist, desto höher die Temperatur. Im Gegensatz zu den chaotischen Schüttelbewegungen der Moleküle in einem Mikrowellengerät werden die Elektronen in den Kavitäten der SLS gezielt in eine Richtung beschleunigt. Dies erreicht man mit Hilfe der Steuerungselektronik, die dafür sorgt, dass die Mikrowellenfelder auf den Umlauf des Elektronenpaketes synchronisiert werden (daher der Name Synchrotron).

Sobald die Elektronen eine kinetische Energie von 2.4 GeV (GeV = Giga-Elektronenvolt, 2.4 GeV = Energie eines Elektrons nach Durchlaufen einer Spannung von 2.4 Mia. Volt)

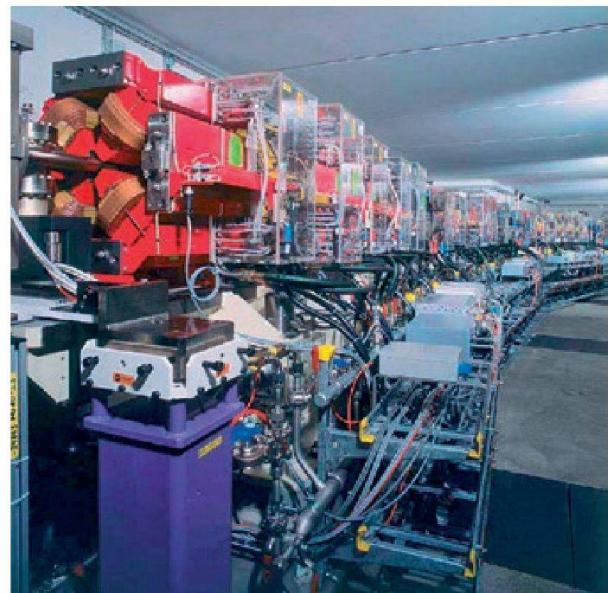


Abb. 5: Rund 350 Magnete zwingen die Elektronen im 300 m langen Speicherring der SLS auf eine Kreisbahn und sorgen dafür, dass die Elektronenpakete möglichst klein bleiben. Foto: PSI.

erreicht haben, werden sie in den Speicherring transferiert. Dort kreisen rund 400 Elektronenpakete in Abständen von 60 cm. Jedes Paket enthält rund 10 Mia. Elektronen und hat eine Geschwindigkeit, die sehr nahe an der Lichtgeschwindigkeit liegt. Würde ein solches Elektronenpaket zusammen mit einem Lichtblitz auf ein Wettrennen zum Mond geschickt, würde das



Abb. 4: Inneransicht der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Sie ist im Prinzip ein riesiges Mikroskop, um tief ins Innere der Materie zu schauen. Bild: Bramaz/PSI.

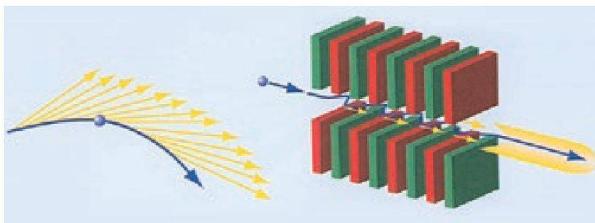


Abb. 6: Linkes Bild: Ablenkmagnete beschleunigen die Elektronen (blau) im Speicherring und halten sie damit auf einer Kreisbahn. Dabei entsteht ein kontinuierliches Spektrum von Synchrotronlicht (gelb).

Rechtes Bild: Undulatoren und Wiggler sind mit Magneten (rot und grün entsprechen Nord- und Südpol) aufgebaut, die die Elektronen auf Slalombahnen zwingen. Die dabei entstehenden Wellen überlagern sich so, dass extrem gebündeltes und hochintensives Synchrotronlicht (gelb) entsteht. Grafik: PSI.

Elektronenpaket nur 8 m hinter den Lichtblitz zurückfallen. Bei derart grossen Geschwindigkeiten gelten die Gesetze der Relativitätstheorie. Daraus ergibt sich eine Massenzunahme, die nach der berühmten Einstein'schen Formel $E = mc^2$ der kinetischen Energie der Elektronen entspricht. Die Masse eines kreisenden Elektrons beträgt demnach rund das 5000-fache der Ruhemasse der Elektronen, die als Energie ausgedrückt 511 keV beträgt. Dies bedeutet, dass jedes der kreisenden Elektronen so viel Masse hat wie zweieinhalb Wasserstoffatome! Dass dies wirklich so ist, wird durch die Magnetfelder bestätigt, die notwendig sind, um die Elektronen auf der vorgeschriebenen Kreisbahn zu halten – diese müssen um denselben Faktor 5000 erhöht werden. Die oben erwähnten magnetischen Linsen sind übrigens so präzise, dass ein einzelnes Elektron in jeder der 400 Wolken rund einen Tag überlebt. Es kann also ca. 100 Mia. Runden drehen, bis es zufälligerweise an die metallische Rohrwand geschieudert wird und als kleiner Strom abfliesst. Dies kann nach einer Kollision mit einem Luftmolekül passieren, woraus klar wird, dass die Leistung der SLS ganz wesentlich von der Ultrahochvakuum-Technik abhängt. Die evakuierten Rohre der Anlage enthalten in jedem cm^3 etwa gleich wenige Luftmoleküle, wie in jedem cm^3 um die internationale Raumstation ISS anzutreffen sind, also rund 10 Mio. Luftmoleküle (Druck $\approx 10^{-12}$ bar). Diese Zahl erscheint riesig, muss aber in Beziehung zur Winzigkeit der Moleküle gebracht werden. Stellt man sich ein Luftmolekül vergrössert als Baumnuss vor, würde man die nächste Nuss in ca. 6 km Entfernung finden und die Wahrscheinlichkeit, dass ein in beliebiger Richtung fliegendes Griesskorn (entsprechend dem Elektron) eine Nuss trifft, wäre in der Tat äusserst klein – aber nicht Null. Deshalb gehen Elektronen dauernd verloren und müssen nachgeliefert werden, was durch die anfangs erwähnten max. drei Pakete pro Sekunde mit je 100 Mio. Elektronen geschieht.

Zum Verständnis der SLS fehlt nun nur noch der Schritt von den Elektronen zum Licht, also zum eigentlichen Produkt der Anlage. Grundlegende physikalische Gesetze sagen, dass

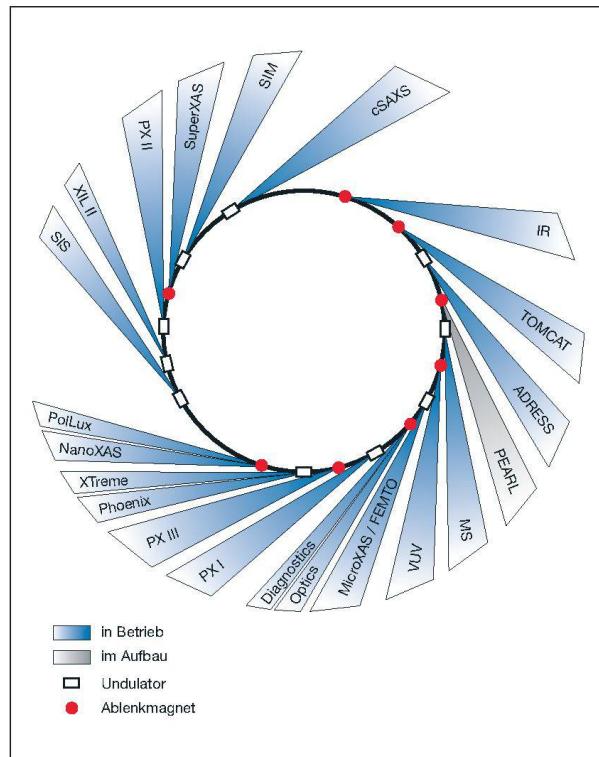


Abb. 7: Die Experimentierplätze (18 Strahllinien, Stand Jan. 2011) der SLS sind tangential zum Speicherring angeordnet und werden für folgende Themen benutzt:

ADDRESS	Resonanz-Spektroskopie
cSAXS	Kleinwinkel-Röntgenstreuung
IR	Infrarot-Spektroskopie für chemische Analysen
MicroXAS/FEMTO	Röntgen-Absorption-Spektroskopie/ultraschnelle Prozesse
MS	Materialforschung
Optics/Diagnostics	Tests im Dienst der SLS
PEARL	Photoelektronendiffraktion und Tunnelmikroskopie (im Aufbau)
PolLux/NanoXAS	Röntgen-Mikrospektroskopie/Röntgen-Absorption-Spektroskopie
PX1, PX2, PX3	Protein-Strukturanalyse mit Röntgenstrahlen
SIM	Mikroskopie magnetischer Oberflächen
SIS	Spektroskopie neuer Materialien
SuperXAS	Umwelt- und Materialforschung
TOMCAT	Röntgen-Mikrotomografie
VUV	Vakuum-Ultraviolett-Strahlung
XIL2	Röntgen-Interferenz-Lithografie
XTreme/Phoenix	Röntgen-Absorption-Spektroskopie unter extremen Bedingungen/dito für Umwelt- und Materialforschung

Grafik: PSI.

beschleunigte Ladungen elektromagnetische Wellen abstrahlen. In einem Radiosender oder im Handy geschieht dies in der Antenne, in der Elektronen in einem Draht hin und her pendeln – es entstehen Radiowellen, die sich von Licht oder Röntgenstrahlung lediglich durch ihre Frequenz (oder Wellenlänge) unterscheiden. In der SLS wird Licht (Infrarot bis Röntgenstrahlung) erzeugt, indem die Elektronenwolken durch Magnete abgelenkt werden (Abb. 6). Dies geschieht einerseits durch die Magnete, die für die Kreisbahn sorgen, andererseits sind auch magnetische Slalomstrecken für die Elektronenwolken (sogenannte Undulatoren oder Wiggler) eingebaut, die besonders brillante Strahlung ergeben. Strahlung ist Energie, die den Elektronen abhanden kommt. Damit diese nicht langsamer werden, wird die abgestrahlte Energie mit Hilfe von zwei im Speicherring eingebauten Kavitäten nachgeliefert, in denen Mikrowellen mit einer Frequenz von 500 MHz schwingen. Die Wellenlänge dieser Mikrowellen (Lichtgeschwindigkeit dividiert durch die Frequenz) ist 60 cm, die erwähnte Distanz zwischen zwei Elektronenwolken! Das Synchrotronlicht wird tangential zum Speicherring abgestrahlt und in evakuierten Rohren zu den Experimenten geleitet. Da die Wellenlänge des erzeugten Lichtes an jeder Strahlinie separat zwischen Infrarot- und Röntgenstrahlung gewählt werden kann, erschließt sich ein riesiges Anwendungsgebiet. Abb. 7 zeigt den Stand der Strahllinien im Januar 2011 und gibt eine kurze Angabe des Einsatzgebietes jeder Strahlinie.

2.3 Der Protonenbeschleuniger als Quelle für Myonen und Neutronen

Funktion des Hochleistungs-Protonenbeschleunigers

Der seit den 1970er Jahren mehrmals ausgebauten und optimierten Beschleuniger für Protonen erzeugt auch heute immer noch den weltweit leistungsstärksten Protonenstrahl. Die erreichten 2 mA Protonen-Stromstärke multipliziert mit deren kinetischer Energie von 590 MeV (1 MeV = 1 Mega-Elektronenvolt = Energie eines Protons nach Durchlaufen einer Spannung von 1 Mio. Volt) ergibt eine Strahleistung von rund 1200 kW. Dies entspricht etwa der Motorenleistung eines grossen Lastwagens konzentriert auf einen Strahl mit dem Durchmesser eines Bleistiftes.

Die Beschleunigung der Protonen geschieht in drei Stufen: Durch Ionisation von Wasserstoff gewonnene Protonen werden mit einer Hochspannung von 870 kV vorbeschleunigt. Sie gelangen dann in einen ersten Ringbeschleuniger, der ihre Energie auf 72 MeV erhöht, bevor sie in den in Abb. 8 gezeigten grossen Ringbeschleuniger injiziert werden. Beide Ringbeschleuniger arbeiten mit dem Zyklotron-Prinzip: Die Protonen werden in der Nähe des Zentrums eingespeist, wo sie



Abb. 8: Das historische Herzstück der Grossanlagenforschung am PSI: Der Protonen-Ringbeschleuniger. 8 Ablenkagnete (blaugrün) halten die Protonen auf einer spiralförmigen Bahn. Die 4 Kavitäten (grau) beschleunigen die Protonen. Bild: PSI.

durch starke Magnetfelder auf nahezu kreisförmigen Bahnen gehalten werden. Durch elektromagnetische Wechselfelder in 4 Kavitäten (50 MHz) erhalten sie bei jedem Durchgang zusätzliche Energie, analog wie dies im Zusammenhang mit der SLS beschrieben wurde. Anders als beim Synchrotron der SLS, wo die Elektronen während ihrer Beschleunigung immer denselben Bahnradius haben, wird beim Zyklotron der Bahnradius immer grösser. Die Protonen bewegen sich also auf einer Spirale und zwar so, dass sie immer gleichviel Zeit für einen Umlauf brauchen. Ihre Geschwindigkeit nimmt deshalb proportional zum Bahnradius zu und erreicht beim grösstmöglichen Radius nach 220 Umdrehungen rund 80% der Lichtgeschwindigkeit. Der so produzierte intensive Hochleistungs-Protonenstrahl wird zur Erzeugung von Myonen und Neutronen verwendet, die für verschiedene Projekte eingesetzt werden. Eine Auswahl solcher Projekte wird im Abschnitt 3 behandelt. Im Folgenden werden grundlegende Eigenschaften von Myonen und Neutronen und deren Eignung als Messsonden erklärt.

Myonen als Sonden für Magnetfelder im Inneren der Materie

Am PSI werden Myonen (siehe Kasten) hergestellt, indem der Protonenstrahl auf einen Kohlenstoff-Ring (Target) gelenkt wird. Die meisten Protonen fliegen unbeschädigt durch den Kohlenstoff hindurch, einige kollidieren jedoch mit den Atomkernen des Kohlenstoffs. Dabei wird die Einstein-Formel $E = mc^2$ in der weniger bekannten Richtung wichtig. Es wird nicht wie im Kernkraftwerk Masse in Energie umgewandelt (im KKW Gösgen ist dies rund ein kg pro Jahr), sondern es wird die kinetische Energie der Protonen in Masse umgewandelt. Dabei entstehen allerlei Teilchen, die vorher in keiner Art und Weise vorhanden waren. Darunter befinden sich Pionen, die aus einem up- und einem down-Quark bestehen, wobei eines

der beiden Quarks ein Antiteilchen ist. Sie zerfallen sehr rasch in Myonen (zusätzlich entstehen je ein Myon-Neutrino und ein Myon-Antineutrino), die für Experimente benutzt werden. Diese Myonen haben neben ihrer Ladung zwei weitere Eigenschaften, die auch Elektronen haben: Sie haben einen Drall um eine Achse, der „Spin“ genannt wird und zusätzlich ein magnetisches Moment, ähnlich einer Kompassnadel. Beide Eigenschaften sind eng miteinander verbunden – Spin und magnetisches Moment sind parallel zueinander. Mit ausgeklügelten Systemen gelingt es (Abb. 9), feine Myonenstrahlen zu erzeugen, bei denen alle Myonenspins in dieselbe Richtung schauen (sog. polarisierte Myonenstrahlen). In einem Magnetfeld präzidieren diese Spins analog wie ein schief stehender Kreisel im Gravitationsfeld. Jedes Myon zerfällt nach rund 2 Mikrosekunden in ein Elektron, das vorwiegend in der Richtung des Myonenspins wegfliest. Mit Hilfe von Detektoren werden die Ströme der in verschiedenen Richtungen wegfliedenden Elektronen gemessen und daraus die Präzessionsfrequenz bestimmt. Diese ist proportional zum interessierenden Magnetfeld. Die Forschenden verwenden feine Myonenstrahlen und regulieren deren Eindringtiefe in einen auszumessenden Festkörper, indem sie deren Geschwindigkeit verändern. So erhalten sie ein hochauf-

gelöstes dreidimensionales Bild des Magnetfeldes, beispielsweise in einem Supraleiter sehr nahe an seiner Oberfläche. Bei Myonen und Elektronen gibt es nicht nur das negativ geladene Teilchen, sondern auch das positiv geladene Antiteilchen (die Antielektronen nennt man Positronen). Für die Material- und Festkörperforschung verwendet man am PSI nur die positiven Myonen, weil die negativen Myonen leicht an die Stelle der Elektronen treten können und von Atomkernen der zu untersuchenden Probe eingefangen werden.

Neutronen zur Durchleuchtung ergänzen Röntgenbilder

Neutronen haben keine Ladung und können deshalb nicht beschleunigt werden. Deshalb benutzt man am PSI den Hochleistungsprotonenstrahl auch zur Erzeugung von Neutronenstrahlen. In der Spallationsneutronenquelle SINQ (Abb. 10) trifft der Protonenstrahl auf einen Bleiblock als Target. Kollidiert dabei ein Proton mit einem Bleikern, wird dieser aufgeheizt und „dampft“ 10 bis 20 Neutronen ab. Diese Neutronen sind sehr schnell, viel zu schnell für die Experimente. Um sie nach ihrer Erzeugung abzubremsen, befindet sich das gesamte Target in einem Tank, der mit schwerem Wasser (D_2O) gefüllt ist. Durch Kollisionen mit den Kernen des schweren Wasserstoffs (D = Deuterium, ein Isotop des Wasserstoffs, dessen Atomkern zusätzlich zum Proton noch ein Neutron enthält) werden die Neutronen abgebremst, wobei sog. thermische Neutronen entstehen.

Neutronen sind wie Elektronen, Protonen und Photonen (Lichtteilchen) sowohl Teilchen wie auch Wellen. Aus diesem Grunde kann man sie wie Licht zum Fotografieren verwenden. Gegenüber sichtbarem oder Röntgenlicht haben aber die Neutronen ganz andere Eigenschaften. So durchdringen Neutronenstrahlen Blei- und Metallwände mit Leichtigkeit, bilden jedoch Wasserstoff-haltige Moleküle wie Wasser oder Öl mit gutem Kontrast ab. So lässt sich beispielsweise eine in einem Bleibehälter

Was sind Myonen?

Alle uns umgebenden Gegenstände und auch wir selbst sind aus Protonen, Neutronen und Elektronen aufgebaut. Wirklich elementar ist aber nur das Elektron. Die Bestandteile der Atomkerne (Protonen und Neutronen) sind aus den beiden elementaren Quarks mit den Namen „up“ und „down“ aufgebaut: Protonen bestehen aus zwei up- und einem down-Quark, Neutronen aus nur einem up- und dafür zwei down-Quarks. Da up-Quarks eine Ladung von plus 2/3 der Elementarladung haben (Elektronen haben minus eine Elementarladung) und down-Quarks minus 1/3 der Elementarladung, ergeben sich die korrekten Ladungszahlen von plus 1 für das Proton und 0 für das Neutron. Es ist eine eigenartige und noch nicht verstandene Laune der Natur, dass neben der Familie up-, down-Quark, Elektron und Elektron-Neutrino zwei weitere Familien analoger, aber schwererer Teilchen existieren. Dies sind jedoch ausschließlich instabile, kurzlebige Teilchen, mit denen keine stabile Materie gebildet werden kann. Zur ersten dieser zwei zusätzlichen Familien gehört das Myon, die Cousine des Elektrons. Wie das Elektron hat auch das Myon eine Elementarladung, ist aber rund 200 mal schwerer. Dazu ist es instabil und zerfällt im Mittel nach 2.2 Mikrosekunden in ein Elektron. Beim Zerfall entstehen zusätzlich zwei sehr leichte Teilchen, nämlich ein Myon-Neutrino und ein Elektron-Antineutrino.

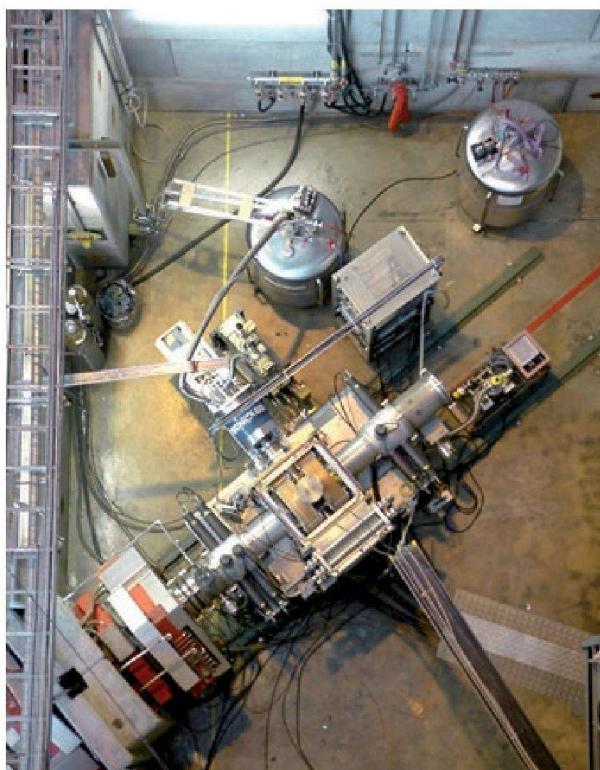


Abb. 9: Apparatur zur Messung des Myon-Spins, insbesondere für Material- und Festkörperforschung (Vogelperspektive). Bild: PSI.

Natur im Aargau 2011 – Jubiläumsband

Fritz Gassmann:

Das Paul Scherrer Institut – Spitzenforschung im Aargau



Abb. 10: Die Neutronenquelle SINQ erzeugt intensive Neutronenstrahlen. Dazu wird der PSI-Protonenstrahl im Zentrum der SINQ auf ein Bleitarget gelenkt. Bild: PSI.

eingeschlossene Rose mit Hilfe von Neutronen fotografieren. Diese Eigenschaft machen sich die Forschenden am PSI zu Nutze für die Erzeugung überraschender Bilder (vgl. Abschnitt 3.3). Dabei geht es immer darum, Gegenstände zerstörungsfrei zu durchleuchten, bei denen die Röntgentechnik zu wenig Information liefert oder ganz versagt.

Neutronen können auch analog wie Röntgenstrahlen dazu benutzt werden, die Struktur von Kristallen zu bestimmen. Selbst für die Grundlagenforschung sind ultrakalte, d.h. sehr langsame, Neutronen ein äußerst spannendes und aktuelles Thema, weil ultragenaue Messungen der Stärke ihres elektrischen Dipolmomentes Rückschlüsse über den Urknall und den Aufbau des Kosmos ermöglichen. Insbesondere kann so der Frage nachgegangen werden, weshalb der Kosmos heute im Wesentlichen aus Materie besteht, nachdem beim Urknall Materie und Antimaterie etwa zu gleichen Teilen gebildet wurden.

2.4 Protonentherapie – unmittelbarer Profit für die Gesellschaft

Direkt und unmittelbar profitieren Teile der Gesellschaft vom Protonentherapie-Ambulatorium des Instituts. In der Zusammenarbeit mit dem Institut Jules Gonin der Universität Lausanne wurde 2008 in der Optis-Anlage der 5000. Krebspatient mit einem Augentumor behandelt (Abb. 11). Mit einer Erfolgsrate von über 98 % steht das PSI international an vorderster Front bei der Bestrahlung von Augenmelanomen. Weiter konnten rund 700 Patienten (davon 25% Kinder und Jugendliche) mit tief liegenden Tumoren mit einer ermutigenden Erfolgsrate

von 80% bestrahlt werden. Der Erfolg und die gesellschaftliche Relevanz dieses Projekts haben den Kanton Aargau 2008 dazu bewogen, dem PSI einen Förderbeitrag von 20 Mio. CHF für die Weiterentwicklung der Protonentherapie zuzusprechen. Dadurch werden in Zukunft noch mehr Krebspatienten von



Abb. 11: Die Bestrahlungsstation Optis-2 zur Behandlung von Augenmelanomen mit Protonen (Inbetriebnahme 2010). Bild: PSI.

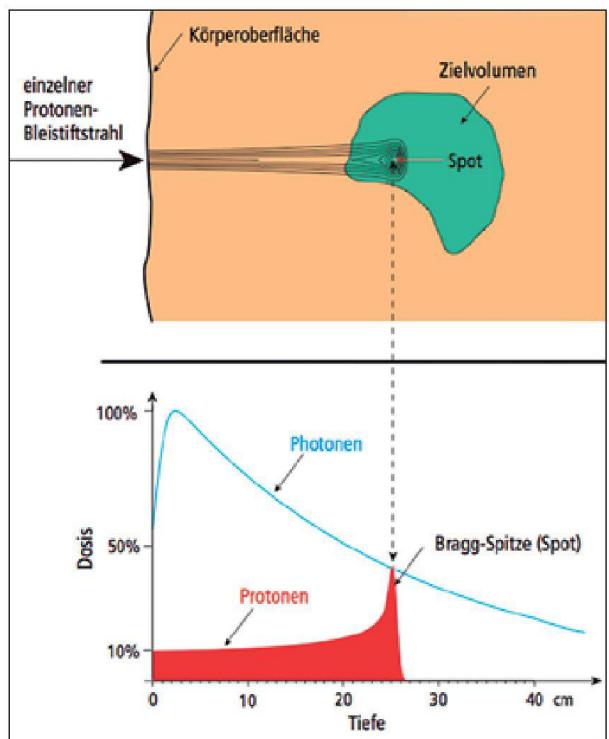


Abb. 12: Bestrahlung eines tief liegenden Tumors. Oben: Dosisverteilung als Höhenlinien dargestellt. Unten: Dosiswerte längs der Tiefe (rot) im Vergleich mit einem Röntgenphotonen-Dosisverlauf (blau). Grafik: PSI.



Abb. 13: Das am PSI entwickelte neue supraleitende Protonen-Zyklotron COMET ist die kompakteste derartige Maschine weltweit. Im unteren Bildteil erkennt man die Komponenten, die den extrahierten Strahl zu den Bestrahlungsstationen leiten. Bild: PSI.

Wissenschaft und Technik

dieser innovativen Therapie profitieren. Bereits früh interessierten sich die Forschenden am Protonenbeschleuniger für Anwendungen der erzeugten Strahlen im medizinischen Bereich. So wurden auch Pionen auf deren Eignung zur Krebstherapie untersucht, zu Gunsten der Protonen aber wieder fallen gelassen. Protonen sind für die Zerstörung des Tumorgewebes besonders geeignet, weil sie ihre grösste Wirkung in der Tiefe des Körpers und damit im Tumor entfalten (Abb. 12). Das PSI hat die Spot-Scan-Technik entwickelt, mit der die Strahlendosis sehr präzise an die meist unregelmässige Form des Tumors angepasst und so das gesunde Gewebe noch besser als mit herkömmlichen Strahlentherapie-Techniken geschont werden kann. Laufende Forschungsarbeiten haben zum Ziel, diese Bestrahlungstechnik weiter zu verbessern, damit sie auch für sich bewegende Tumoren (z.B. in Lunge oder Brust) mit hoher Präzision eingesetzt werden kann. Die Protonentherapie wird immer dann eingesetzt, wenn sie einen wesentlichen medizinischen Vorteil gegenüber der Röntgenbestrahlung aufweist. Das trifft zu, wenn eine höchstmögliche Präzision der Strahlenabgabe in den Tumor erforderlich ist, z.B. wenn der Tumor im Gehirn, in den Augen oder im Bereich der Wirbelsäule sitzt. Das heisst überall dort, wo entweder nicht operiert werden kann, oder mit den herkömmlichen strahlentherapeutischen Methoden im gesunden Gewebe und in

kritischen Organen zu viel Schaden verursacht würde. In den Anfängen der Protonentherapie wurde vom grossen für die Forschung bestimmten Protonenbeschleuniger ein kleiner Teil des Strahls abgezweigt und für die Therapie benutzt. Mit zunehmender Patientenzahl haben sich jedoch die unvermeidlichen Abschaltungen der Forschungsanlage immer störender ausgewirkt. Um den Patientenbetrieb noch weiter ausdehnen

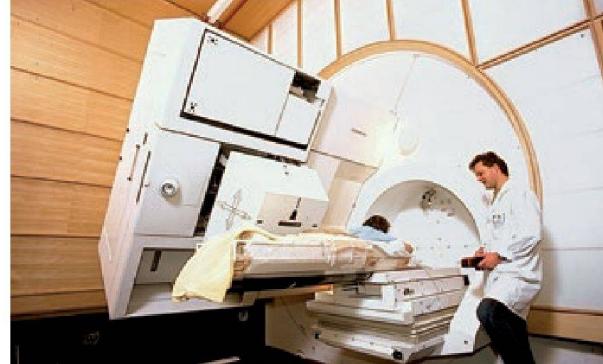


Abb. 14a: Die 1996 in Betrieb genommene Gantry-1 war die erste Protonengantry Europas zur Bestrahlung tief liegender Tumoren, die den Strahl um 360° drehen kann.



Abb. 14b: Die 2012 in Betrieb gehende neue Gantry-2 kann den Strahl in zwei Richtungen ablenken und erfüllt so die Voraussetzung für die Bestrahlung von Tumoren, die beispielsweise bei der Atmung des Patienten die Lage verändern. Bilder: PSI.

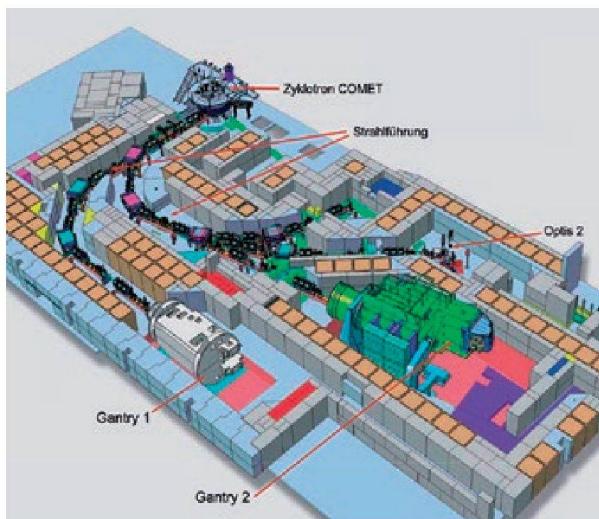


Abb. 15: Überblick über das PSI-Protonenbestrahlungszentrum mit Optis-2 für Augenmelanome sowie Gantry-1 und Gantry-2 für tiefliegende Tumoren. Ab der Inbetriebsetzung der neuesten Gantry-2 im Jahr 2012 können jährlich ca. 500 Patienten von der Protonentherapie am PSI profitieren. Schema: PSI.

zu können, wurde deshalb ein neues Zyklotron (Abb. 13) entwickelt und 2008 in Betrieb genommen. Dieses wird nun tagsüber ausschliesslich für die Krebsbestrahlung verwendet. Seine kompakte Bauweise stiess bei Spitätern weltweit auf Interesse und auch in der Schweiz entbrannte eine Diskussion über weitere Standorte für mögliche Protonen-Therapiezentren. Um mit der Entwicklung Schritt halten zu können, wird eine Gantry-2 (Abb. 14) aufgebaut, die den Protonenstrahl in zwei Richtungen ablenken kann und mit entsprechenden Zusatzgeräten geeignet wäre, auch Tumoren zu bestrahlen, die sich bewegen, z.B. bei der Atmung oder dem Herzschlag des Patienten. Die Gesamtanlage besteht demnach ab 2012 aus einem Protonenbeschleuniger, der Station Optis-2 zur Behandlung von Augenmelanomen und den Stationen Gantry-1 und Gantry-2 zur Bestrahlung tief liegender Tumoren (Abb. 15). *Gantry* bedeutet drehbares Gerüst und wird im Zusammenhang mit Bestrahlungsanlagen als Fachbegriff verwendet.

3. Beispiele für Forschungsthemen des PSI

Die Forschungsthemen des PSI lassen sich gruppieren um die Themen Mensch und Gesundheit, Energie und Umwelt, Nanowissenschaften und Materialforschung sowie Elementarteilchen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden Beispiele für Projekte aus jedem dieser vier Bereiche vorgestellt.

3.1 Projekte zum Thema Mensch und Gesundheit

Die Ziele der Forschung auf dem Gebiet Mensch und Gesundheit bestehen darin, wesentliche Vorgänge in lebenden Organismen auf molekularer Ebene zu verstehen und neue Methoden zur Diagnose und Behandlung von Krankheiten zu entwickeln. Im Mittelpunkt der Forschung zu biologischen Grundlagenfragen steht die Bestimmung von Struktur und Funktion von Proteinen. Dies sind Biomoleküle, die in vielfältiger Weise das Verhalten von lebenden Zellen steuern.

Proteinkristallographie für die Entwicklung neuer Medikamente

Synchrotronlicht ist sehr intensiv und stark gebündelt – Fachleute sagen, es sei besonders brillant. Dank dieser Lichteigenschaften können sehr kleine Proben untersucht werden. Das ist zum Beispiel für die Proteinkristallographie wichtig. Hier wird die Struktur von komplexen Eiweißmolekülen (Proteinen) an entsprechenden Kristallen untersucht. Da es schwierig und sehr zeitaufwendig ist, solche Kristalle herzustellen, ist es ein grosser

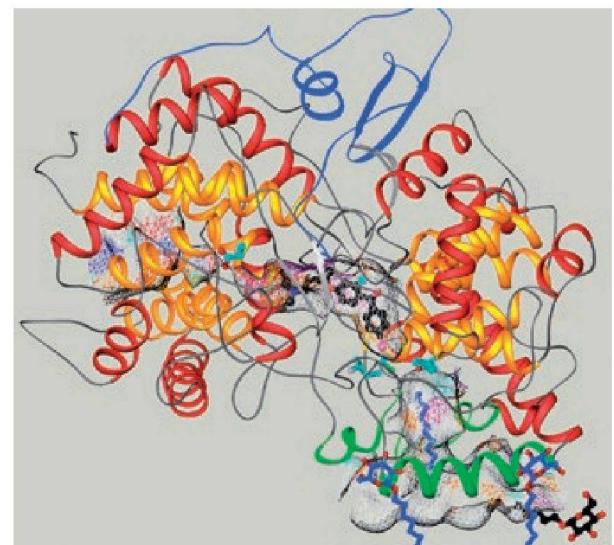


Abb. 16: Dreidimensionale Struktur des menschlichen OSC-Proteins. Sie könnte der Schlüssel für die Entwicklung eines Cholesterin senkenden Medikamentes sein. Bild: Roche.

Vorteil, wenn man die Experimente mit nur Zehntelmillimeter messenden Kristallen durchführen kann. 2004 gelang es beispielsweise einer Forschungsgruppe von Hoffmann-La Roche, mit Hilfe der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) die Struktur eines Proteins namens OSC (Oxidosquale Cyclase) aufzuklären (Abb. 16), das an der Produktion von Cholesterin entscheidend beteiligt ist. Mit diesem Wissen könnte ein neuer Typ Cholesterin senkender Medikamente entwickelt werden, der die bisher verwendeten Statine ergänzen könnte.

Bessere Röntgenbilder in der Medizin durch Phasenkontrast

Die klassische Bildgebung mittels Röntgenstrahlung ist ein äußerst wichtiger Bestandteil der medizinischen Diagnostik. Der Bildkontrast entsteht durch die unterschiedliche Absorption in verschiedenen Geweben. Knochen sind in Röntgenbildern deutlich sichtbar, während weiche Gewebe kaum Kontrast liefern. Ein neuartiges an der SLS entwickeltes Phasenkontrast-Bildgebungsverfahren basiert nicht nur auf der Absorption von Röntgenstrahlen, sondern auch auf der Brechung der Strahlen an kleinsten Dichteunterschieden im Gewebe. Damit werden

die früher verschwommenen Bilder sehr viel schärfer (Abb. 17). Die Einführung dieser Technik in Spitäler und Arztpraxen wird die medizinische Diagnostik revolutionieren. Für Untersuchungen, bei denen die hohe Bildqualität dieser neuen Technik nicht notwendig ist, kann die Intensität der Röntgenstrahlung oder die Belichtungszeit reduziert werden. Es entstehen so dieselben Bilder wie mit herkömmlichen Apparaturen, jedoch bei stark reduzierter Strahlenbelastung der Patienten.

Tomografie im Kampf gegen Osteoporose und Alzheimer

Mit der Tomcat-Strahllinie der SLS werden besonders scharfe, dreidimensionale Röntgenbilder produziert. Mit Hilfe der Röntgen-Mikrotomografie kann man ins Innere von Proben sehen, ohne diese zu zerstören. Detaillierte Bilder zeigen Spuren von Alzheimer in der Architektur der Blutgefäße von Maushirnen. Weiter werden von Osteoporose (Knochenschwund) befallene Knochen (Abb. 18), versteinerte Lebewesen, Alulegierungen oder Keramiken durchleuchtet und auf dem Computer-Bildschirm dreidimensional dargestellt. Mit dem intensiven SLS-Strahl sind solche Bilder mit einer Auflösung von etwa einem Tausendstel Millimeter innerhalb weniger Minuten möglich.



Abb. 17: Herkömmliche Röntgen-Tomografie eines Rattengehirns (oben) und neuartige Phasenkontrast-Röntgen-Tomografie (unten). Bilder: M. Stampanoni, PSI/ETHZ.

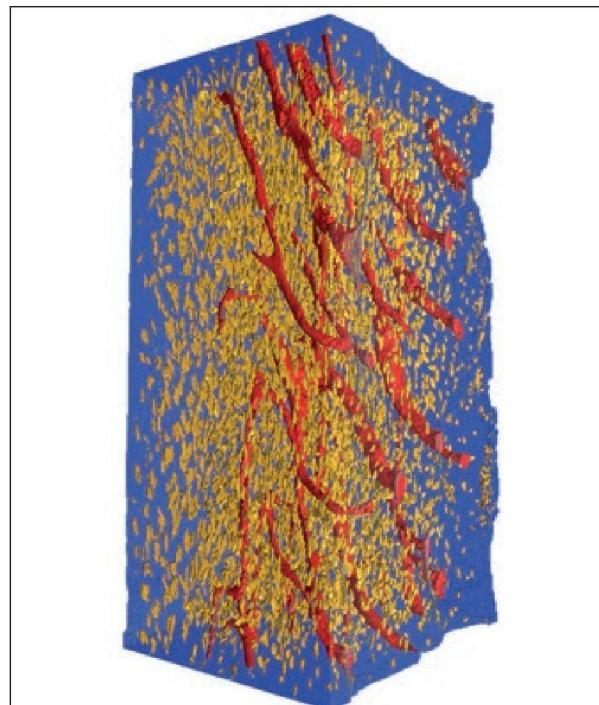


Abb. 18: Mikrotomografische Aufnahme einer $0.2 \times 0.2 \times 0.4 \text{ mm}^3$ grossen Knochenprobe. Aus den Knochenzellen (gelb) und den Blutgefäßen (rot) erhält man Informationen über die Knochenmechanik und die Durchblutung. Damit kann die Wirkungsweise neuer Medikamente gegen Osteoporose untersucht werden. Bild: PSI.

3.2 Projekte zum Thema Energie und Umwelt

Die Energieforschung am PSI konzentriert sich auf die Erforschung von Prozessen, die in nachhaltigen und sicheren Technologien für eine möglichst CO_2 -freie Energieversorgung eingesetzt werden können. So arbeiten Forschende an Verfahren zur CO_2 -neutralen Erzeugung von Energieträgern – sei es mit Hilfe hochkonzentrierter Sonnenstrahlung, sei es auf Grundlage von Biomasse wie etwa Holz, Gülle oder Klärschlamm. Für eine nachhaltige Energienutzung ist auch die Möglichkeit, Energie zu speichern, wesentlich. Das PSI beteiligt sich an dieser Forschung insbesondere mit seinen Arbeiten zu Lithium-Ionen-Batterien. Ein weiteres Forschungsthema sind Brennstoffzellen, die aus der Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie erzeugen. Dazu kommen Arbeiten zur sicheren Nutzung der Kernenergie. Ein Schwerpunkt ist dabei, die Vorgänge in vorhandenen und zukünftigen Kernkraftwerken noch besser zu verstehen, um so zu deren sicherem Betrieb beizutragen. Hinzu kommen geologische Untersuchungen als Grundlage für die Suche nach geeigneten Standorten für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Über Untersuchungen zu einzelnen Energietechnologien hinaus widmen sich Forschende des PSI dem Vergleich von nuklearen, fossilen und erneuerbaren Energiesystemen mittels einer ganzheitlichen Betrachtungsweise. Die Umweltforschung am PSI befasst sich vorrangig mit der Zusammensetzung der Atmosphäre und den Prozessen, die diese Zusammensetzung bestimmen – dazu misst das PSI etwa auf dem Jungfraujoch oder untersucht Eisbohrkerne. Insbesondere der menschliche Einfluss auf die Atmosphärenzusammen-

setzung sowie die Entwicklung des Klimas in den vergangenen Jahrhunderten ist für die Forscher von Interesse. Darüber hinaus leitet das PSI das Kompetenzzentrum für Energie und Mobilität CCEM des ETH-Bereichs (vgl. Abschnitt 5).

Der Solarofen und der Solarsimulator

Die gesamte Energie, die die Menschheit zu 80% in der Form fossiler Energie verbraucht, entspricht 0.1 Promille der auf die Erde fallenden Sonnenenergie. Berücksichtigt man den Wirkungsgrad von Solarkraftwerken lässt sich ausrechnen, dass eine Fläche von rund 1000 km mal 1000 km in der Sahara ausreichen würde, um die gesamte Menschheit mit Energie zu versorgen. 1 Mio. km^2 ist rund 25 mal grösser als die Schweiz, bezogen auf die Fläche der Sahara ist dies aber dennoch recht wenig. Diese Abschätzung zeigt das enorme Potenzial der Solarenergie. Sie hat jedoch gegenüber der fossilen Energie wesentliche Nachteile, die überwunden werden müssen. So fällt sie selbst in Wüstengebieten nicht kontinuierlich an, weshalb grosse Energiespeicher unumgänglich sind. Weiter ist das Transportproblem gravierend, da die Hauptverbraucher weit weg von den Wüstengebieten sind und schliesslich ist der Preis für die kWh der Schlüsselenergie Strom aus heutigen Solaranlagen wesentlich höher als aus Wasserkraft, Kernkraft, Gas, Öl oder Kohle.

Die beiden ersten Probleme könnten überwunden werden, wenn es gelingen würde, Sonnenenergie in einen chemischen Energieträger zu verwandeln. Dies ist deshalb das Ziel der Forschungsarbeiten am PSI auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Solartechnik, wofür zwei grössere Anlagen zur Verfügung stehen (Abb. 19): Der Solarofen mit einer Leistung von 40 kW, der Solarsimulator mit 50 kW. Beim Solarofen wird die Sonnenstrahlung mit Hilfe eines 120 m^2 grossen computergesteu-



Abb. 19a: Solarofen. Ein beweglicher Flachspiegel (Heliostat) von 120 m^2 lenkt die Sonnenstrahlung auf einen Parabolspiegel. In seinem Fokus wird sie 5000-fach konzentriert und erzeugt rund 2000°C zur Untersuchung chemischer Hochtemperatur-Prozesse.



Abb. 19b: Solarsimulator mit zehn Xenon-Kurzbogenlampen à je 15 kW für wetterunabhängige Untersuchungen. Im Fokus wird damit eine Leistungsdichte von 1 kW pro cm^2 erreicht, die doppelt so hoch ist wie beim Solarofen. Bilder: PSI.

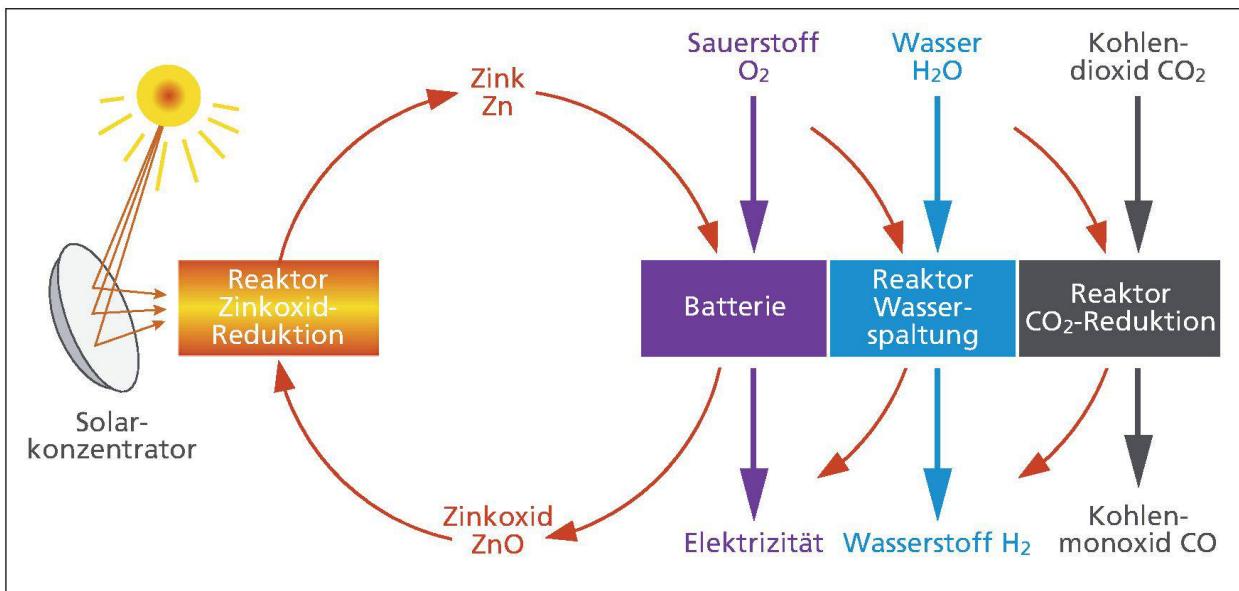


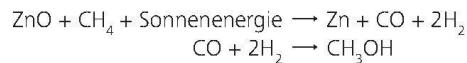
Abb. 20: Kreisprozesse zur Speicherung von Sonnenenergie. Grafik: PSI.

erten Flachspiegels auf einen Parabolspiegel von 8.5 m Durchmesser gelenkt. Dieser konzentriert die Sonnenstrahlung auf einen Brennfleck von rund 10 cm Durchmesser und erzeugt dort einen Energiefluss von rund 5000 Sonnen. Damit werden Temperaturen bis zu 2000°C erreicht, womit sich Löcher in Steinplatten schmelzen lassen. Der Hochfluss-Solarsimulator konzentriert künstliches Licht, das durch zehn 15 kW-Xenon-Lichtbogen-Lampen erzeugt wird. Damit gewährt die Anlage konstante Strahlungsbedingungen und ermöglicht wetterunabhängige Untersuchungen solarchemischer Prozesse. Dazu kommt noch, dass der Energiefluss im Brennfleck sogar 10'000 Sonnen beträgt.

Als Modellzyklus für die Speicherung von Sonnenenergie wird die Reduktion von Zinkoxid (ZnO) zu Zink bei sehr hohen Temperaturen untersucht (Abb. 20). Zink kann anschliessend mit heissem Wasserdampf (H_2O , 400 °C) wieder in Zinkoxid überführt werden, wobei Wasserstoff (H_2) frei wird. Das Zink spielt in diesem Zyklus eine zweifache Rolle. Einerseits ist Zink eine Art Katalysator für die Herstellung von solarem Wasserstoff – es wird beim Prozess nicht verbraucht, da es vollständig recyliert werden kann. Andererseits ist Zink der gesuchte Sonnenenergiespeicher, der gelagert und transportiert werden kann. Diese Eigenschaft ermöglicht eine örtliche Trennung der Sonnenenergieanlagen und der Produktionsanlagen von Wasserstoff. Die Zinkoxid-Reduktion könnte in einem Wüstengebiet stattfinden (z.B. in der Sahara), währenddem die Wasserstoffproduktion in der Nähe der Verbraucherzentren erfolgen könnte. Eine Studie hat gezeigt, dass der Transport von Wasserstoff in einer Pipeline von Afrika nach Europa rund 30% der im Wasserstoff gespeicherten Sonnenenergie verbrauchen würde. Es ist des-

halb energetisch wesentlich günstiger und auch ökonomischer, Zink und Zinkoxid zu transportieren, obwohl deren Tonnagen wesentlich grösser sind.

In Abb. 20 wird gezeigt, dass Strom nicht nur auf der Basis von Wasserstoff in Brennstoffzellen produziert werden kann, sondern auch direkt in Zink-Luft-Batterien. Zink kann aber auch zur Reduktion von CO_2 verwendet werden, wobei wie mit Wasserdampf Zinkoxid entsteht, das recyliert wird. Anstelle von Wasserstoff entsteht aber jetzt Kohlenmonoxid (CO), das zusammen mit Wasserstoff zu Methanol (CH_3OH) weiterverarbeitet werden kann. Methanol ist der einfachste Alkohol und kann als Treibstoff für Verbrennungsmotoren verwendet werden. Das bei Raumtemperatur flüssige Methanol kann aber auch als Edukt für die Synthese von Formaldehyd, Essigsäure oder Biodiesel dienen. Es ist sogar in Brennstoffzellen zur Stromproduktion anstelle von Wasserstoff einsetzbar. Eine weitere Variante des Zink-Zyklus ist die Herstellung von Methanol (CH_3OH) aus Erdgas (CH_4) mit Hilfe von Sonnenenergie. In einem ersten Schritt entsteht Zink und sogenanntes Syngas (synthetisches Gas) nach folgender Formel:



Das entstehende Zink kann gemäss einem der in Abb. 20 dargestellten Prozesse ebenfalls weiterverwendet werden. Im Endeffekt wird Erdgas in andere chemische Energieträger umgewandelt, die zusammengenommen mehr Energie enthalten als das Ausgangsprodukt Erdgas. Man spricht deshalb von der Ver-

edelung fossiler Energieträger durch Sonnenenergie. Anstelle von Methan könnte man auch Kohlenwasserstoff-haltige Industrieabfälle oder Biomasse für die Herstellung von Syngas verwenden, das nicht unbedingt zu Methanol weiterverarbeitet werden muss, sondern beispielsweise in der energieintensiven Zementproduktion als Brennstoff eingesetzt wird.

Brennstoffzellen und Batterien für eine zukünftige abgasfreie Mobilität

Im Januar 2002 überquerte das erste PSI-Brennstoffzellen-Fahrzeug, ein umgebauter VW Bora, den Simplonpass. In der Folge wurde, basierend auf diesen ersten Erfahrungen, ein Brennstoffzellenauto von Grund auf neu entwickelt und optimal auf die elektrische Antriebstechnik mit Brennstoffzellen ausgerichtet (Abb. 21). Das Auto mitsamt an den Vorderrädern sitzenden elektrischen Antriebsmotoren wurde vom Michelin-Versuchslabor in Fribourg (Schweiz) entwickelt und gebaut. Das PSI hat eine dazu passende Brennstoffzelle entwickelt und mit entsprechenden Zusatzaggregaten ausgerüstet. Im Gegensatz zu den üblichen Automotoren wurde die Brennstoffzelle nicht für die bei grossen Beschleunigungen auftretenden Spitzenleistungen, sondern auf die notwendige Dauerleistung ausgelegt. Für eine Höchstgeschwindigkeit von 135 km/h und eine für das Autobahnnetz ausreichende Steigleistung genügt für dieses Auto mit einer Masse von 850 kg eine Brennstoffzellen-Nennleistung von 30 kW. Dies ist rund 2 bis 4 mal weniger als die Motorenleistung normaler Mittelklasswagen. Um dennoch die gewohnte Beschleunigung garantieren zu können, wurden Superkondensatoren eingebaut. Dies sind Elemente, die eine grosse Ladungsmenge speichern können. Im Gegensatz zu einer Batterie finden jedoch bei Lade- und Entladevorgängen keine chemischen Umwandlungen statt. Deshalb

können die Superkondensatoren riesige Ströme aufnehmen oder abgeben und dies beliebig oft. Mit den rund 100 unter der Sitzbank eingebauten Superkondensatoren kann nahezu die für die Beschleunigung von 0 auf 100 km/h notwendige Energie gespeichert werden. Beim Beschleunigen stehen deshalb rund 75 kW (100 PS) Leistung zur Verfügung, die eine Beschleunigungszeit von unter 12 Sekunden erlauben. Die Superkondensatoren kommen aber auch beim Bremsen zum Zug, indem die Elektromotoren auf Generatoren umgeschaltet werden und mit dem erzeugten Strom die Kondensatoren aufladen. Ein beträchtlicher Teil der beim Bremsen üblicherweise in Wärme umgewandelten Energie kann so rezykliert werden, was je nach Fahrsituation eine Energieersparnis von 10-20% ergibt. Ein Bordcomputer optimiert den Ladezustand der Superkondensatoren und entscheidet, wann wieviel Strom abgegeben oder gespeichert werden soll, so dass sich das Auto wie gewohnt fahren lässt. Mit einem Wirkungsgrad der Brennstoffzelle von bis zu 60% entspricht dieses Wasserstoff-Leichtfahrzeug Hy-Light einem Zweiliter-Auto. Es braucht also fast viermal weniger Energie als ein Schweizer Durchschnitts-Personenwagen. Möchte man den Wasserstoff und den Sauerstoff, die in Drucktanks mitgeführt werden, mit Hilfe von Photovoltaik und Elektrolyse selbst herstellen, wäre ein Photovoltaik-Feld von rund 60 m² erforderlich.

Batterien sind ernst zu nehmende Rivalen der Brennstoffzelle (im Gegensatz zu Brennstoffzellen brauchen Batterien keine Gaszufuhr, da die Energie chemisch gespeichert ist). Die Energiedichte von Lithiumionenbatterien, wie sie in Laptops oder Handys verwendet werden, hat im vergangenen Jahrzehnt deutlich auf rund 0.25 kWh/kg zugenommen. Das theoretische Maximum von rund 6 kWh/kg wird man wohl nie erreichen können. Batterien mit 1-2 kWh/kg werden jedoch heute als realisierbar betrachtet. Ein Elektroauto würde mit lediglich 25 bis 50 kg solcher Batterien rund 500 km weit fahren können, was für praktische Zwecke genügen würde. Batterien heutiger Bauart verlieren durch mikroskopische Veränderungen bei Lade- und Entladevorgängen zu schnell an Kapazität, sie altern zu schnell. Am PSI wurde kürzlich ein Verfahren entwickelt, um effizientere und dauerhaftere Lithiumionenbatterien herstellen zu können.

Holzvergasung – alte Idee in neuem Licht

In den Schweizer Wäldern fallen jährlich über 2 Millionen m³ Holz an, die nachhaltig, d.h. ohne die Waldfäche zu verkleinern, für energetische Zwecke genutzt werden könnten. Bei der traditionellen Vergasung von Holz entsteht nach der Abtrennung von Russ und weiterer toxischer Substanzen ein Gemisch aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Methan, Äthan und Kohlendioxid. Dieses Gasgemisch erfüllt nicht die Qualitätsstandards, die für eine Einspeisung ins bestehende sehr dichte Erdgasnetz der Schweiz gesetzlich vorgeschrieben sind. Ein am PSI entwickelter Katalysator kann jedoch dieses Gemisch fast vollständig in Methan und Kohlendioxid umwandeln, so dass

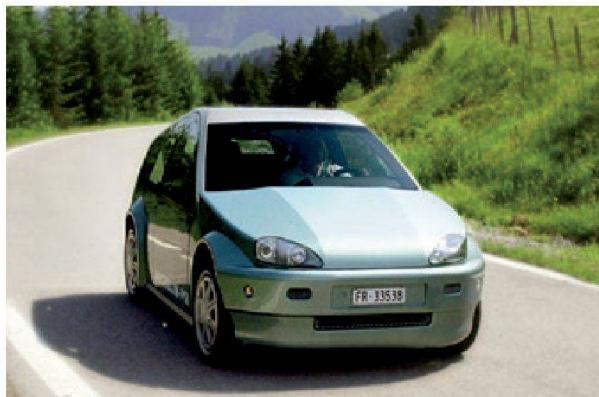


Abb. 21: Das Brennstoffzellen-Testfahrzeug Hy-Light verbraucht das Energieäquivalent von 2 Litern Benzin je 100 km. Bild: PSI.



Abb. 22: Die beiden PSI-Forscher S. Stucki (links) und S. Biollaz (rechts) erhielten 2009 den Preis Watt d'Or des Bundesamtes für Energie BfE für die Katalysatoranlage (Leistung 1 MW, Hintergrundbild) in Güssing, Niederösterreich. Bild: PSI.

es nach der Abtrennung von Kohlendioxid die Einspeisebedingungen ins Gasnetz erfüllt. Nach erfolgreichen Vorversuchen konnte 2008 eine Demonstrationsanlage mit einer Leistung von 1 MW (Abb. 22) in Betrieb genommen werden, die an ein bestehendes Holzschnitzelkraftwerk in Güssing (Niederösterreich) angeschlossen wurde. Es ist vorgesehen, in der Schweiz Standorte für eine oder mehrere Produktionsanlagen für Biogas aus Holz zu finden. Damit könnte rund 5% der heutigen Fahrzeugflotte mit Biotreibstoff betrieben werden. Mit effizienteren Autos würde dieser Prozentsatz um den Faktor 2 bis 4 ansteigen.

Schiffe ohne Rauchfahnen

In der Verbrennungsforschung werden Laser-Messmethoden eingesetzt, um in Hochdruck-Messzylindern bei hoher Temperatur Verbrennungsprozesse zu beobachten. Die Resultate sind dreidimensionale Bilder über die räumliche Verteilung diverser Zwischenprodukte (z.B. kurzlebige OH-Radikale), die in einer stationären Flamme entstehen. Mit aufwendigen mathematischen Modellen, die das Strömungsfeld zusammen mit komplizierten chemischen Reaktionen simulieren, werden an der ETH Zürich dieselben Prozesse untersucht und mit den am PSI gemessenen Bildern verglichen. Stimmen Berechnungen und Messungen überein, haben die Forschenden zumindest die wichtigsten Vorgänge im Inneren einer Flamme verstanden. Dieses grundlegende Verständnis ist unbedingt nötig, um gezielt die Russ- und Stickoxidemissionen von Dieselmotoren entscheidend zu reduzieren. Allerdings geben die stationären Messungen an einer ruhigen Flamme ein allzu vereinfachtes Bild für die sich sehr schnell ändernden Bedingungen in einem laufenden SchiffsDiesel. Um die Tauglichkeit von verschiedenen Massnahmen zur Emissionsreduktion bei realistischen Bedin-



Abb. 23: Teststand mit einem 6-Zylinder Dieselmotor von 1.1 MW Leistung für die Überprüfung von Konzepten zur Reduktion von Emissionen. Bild: PSI.

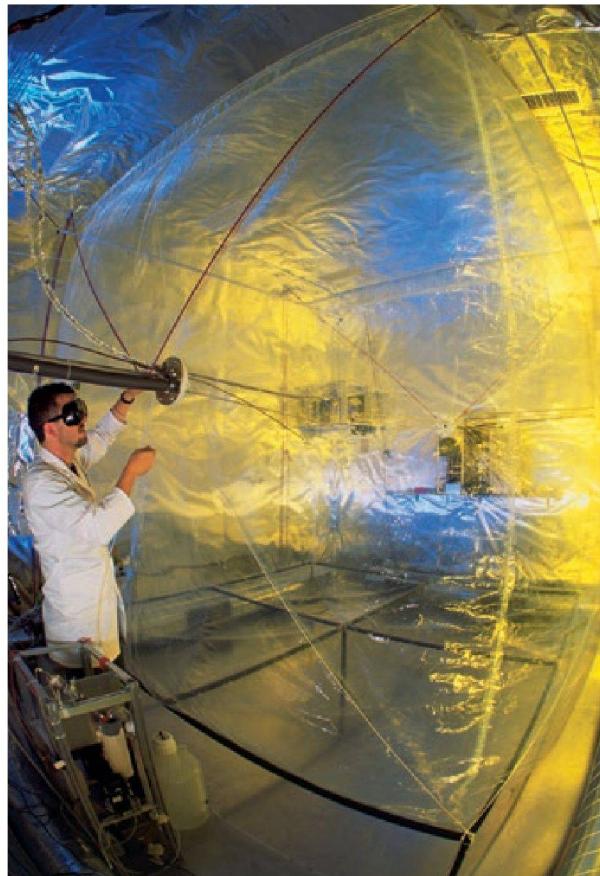


Abb. 24: In der 27 m³ grossen Smogkammer lassen sich luftchemische Vorgänge unter kontrollierten Bedingungen beobachten. Bild: PSI.

gungen zu überprüfen, wurde am PSI ein Teststand für einen 6-Zylinder Dieselmotor mit einer Leistung von 1.1 MW aufgebaut (Abb. 23). Um die während langer Testläufe anfallende mechanische Energie zu nutzen, wird sie mit einem Generator in elektrischen Strom umgewandelt und ins PSI-Netz eingespeist.

Aerosole – kleine Teilchen mit grossen Auswirkungen

Mit Hilfe einer Smogkammer (Abb. 24), eines Luftchemie-Messwagens, eines instrumentierten Motorseglers und von Aussenstationen wie der hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch untersuchen Forschende die Bildung und das Wachstum von Aerosolen in der Atmosphäre. Diese sind sowohl im Hinblick auf die menschliche Gesundheit als auch auf Klimaveränderungen von grosser Bedeutung. Eine wichtige Entdeckung am PSI war, dass sich Aerosole in der Atmosphäre spontan aus gasförmigen Vorläufersubstanzen aufbauen können. In der Smogkammer wurden diese unerwarteten Prozesse nachgeblendet und genau untersucht, so dass sie in Modelle zur Klimavorhersage eingebaut werden können.

3.3 Projekte zum Thema Materialforschung und Nanotechnologie

Steinzeit, Eisenzeit, Bronzezeit – die in einer Epoche von den Menschen bevorzugt verwendeten Materialien spiegeln den jeweiligen Entwicklungsstand wieder. Heute sind elektronische Komponenten als Nanostrukturen auf einem Siliziumsubstrat nicht mehr wegzudenken. Solche "Chips" sind die Basis der modernen Informationstechnologie mit Computern und ebnen den Weg hin zu einem Roboterzeitalter. Die fortschreitende Integration der Elektronik zu immer kleineren Strukturen ist noch keineswegs abgeschlossen. Anhand der Erforschung von Supraleitern und magnetischen Materialien soll gezeigt werden, wie eng die moderne Materialforschung mit Grossforschungsanlagen verwoben ist.

Neutronen und Myonen für die Materialforschung

1996 konnte die Spallationsneutronenquelle SINQ eingeweiht und in Betrieb genommen werden. In ihrem Zentrum treffen die im Zyklotron (vgl. Abschnitt 2) beschleunigten Protonen auf ein Bleitarget und schlagen Neutronen heraus, die dann für Experimente verwendet werden können (Abb. 25). Dank dem weltweit grössten Neutronenfluss können einmalige physikalische Grundlagenexperimente durchgeführt werden. Es können auch Materialien durchleuchtet und analysiert werden, die für Röntgenstrahlen undurchsichtig sind (z.B. Metalle) oder keinen Kontrast ergeben (z.B. Wasserstoff enthaltende Materialien wie Wasser oder Öl).



Abb. 25: Neutronen-Experimentierhalle. Deutlich sichtbar sind die langen Neutronenleiter, die mit Hilfe von speziellen Spiegeln die Neutronen von der Quelle SINQ zu den Experimenten (im Hintergrund) leiten. Bild: PSI.

Ähnlich haben sich die am PSI erzeugten Myonen (der Protonenstrahl wird dafür auf ein Kohlenstofftarget gelenkt) als Sonden zur Untersuchung von Materialien etabliert. So stehen für die Erforschung der Hochtemperatur-Supraleitung Neutronen und Myonen zur Verfügung, die sich gegenseitig ergänzen. Da sich Materialforschung auch mit winzigen Strukturen befasst, wurde am PSI ein Reinraumlabor eingerichtet, um nanotechnologische Methoden anwenden zu können.

Fotografieren mit Neutronen

Neutronen sind wie Elektronen, Protonen und Photonen (Lichtteilchen) sowohl Teilchen als auch Wellen. Aus diesem Grunde kann man sie wie Licht zum Fotografieren verwenden. Verglichen mit sichtbarem oder Röntgenlicht haben jedoch Neutronen ganz andere Eigenschaften. So durchdringen sie Metallwände (z.B. Blei, Stahl) mit Leichtigkeit, bilden jedoch Wasserstoff-haltige Moleküle wie Wasser oder Öl mit gutem Kontrast ab. Diese Eigenschaft machen sich die Forschenden zu Nutze für die Erzeugung überraschender Bilder. So gehören zu den Nutzern der Neutronenstrahlen PSI-Forscher, die die Struktur von Supraleitern oder die Kondensation von Wasser in einer sich im Betrieb befindlichen Brennstoffzelle untersuchen wollen. Daneben interessieren sich Motorenhersteller für die Ölverteilung im Inneren eines laufenden Dieselmotors und Paläontologen für das Hirnvolumen eines fossilen Fischsauriers. Archäologen wollen herausfinden, was sich im Inneren einer antiken Kunstfigur befindet, ohne diese zu zerstören. Weitere Beispiele für Fragen, die mit Hilfe von Neutronen untersucht wurden, sind die Struktur von Dinosaurierknochen und Schalentieren (Abb. 26) oder das Wachstum der Wurzeln einer Pflanze.



Abb. 26 a: Ein Dinosaurierknochen wird mit Hilfe von Neutronen durchleuchtet. Bild: Bramaz, PSI.

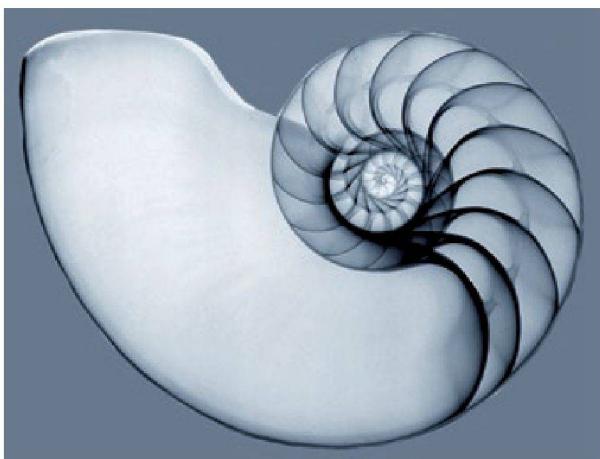


Abb. 26 b: Nautilus-Schale fotografiert mit Neutronen. Die Innenkammern werden erst durch die Durchstrahlung sichtbar. Bild: R. Foelix, ANG und E. Lehmann, PSI.

Raumtemperatur-Supraleiter – ein realisierbarer Traum?

Reibung erzeugt Wärme und Reibung tritt überall auf. Selbst Satelliten unterliegen einer minimalen Reibung durch Luftmoleküle und stürzen deshalb früher oder später auf die Erde. Als einzige Möglichkeit, der allgegenwärtigen Reibung zu entkommen, verspricht die Supraleitung unglaubliche Möglichkeiten. So fällt der elektrische Widerstand unterhalb einer kritischen Sprungtemperatur nicht nur nahezu, sondern exakt auf Null ab. Dies ist das Resultat von quantenmechanischen Effekten, die im Detail noch nicht genau verstanden sind. Der Nachteil heutiger Supraleiter ist deren tiefe Sprungtemperatur, d.h. die Temperatur, unterhalb der ein Material supraleitend ist: Der heutige Rekordhalter ist ein aus verschiedenen

Metallen bestehendes Material ($Hg_{0.8}Tl_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_8$) mit einer Sprungtemperatur von -135°C .

Selbst diese im Vergleich mit anderen Supraleitern relativ hohe Temperatur ist für normale technische Anwendungen immer noch unpraktisch und ineffizient.

Am PSI können Supraleiter sowohl mit Neutronen als auch mit Myonen untersucht werden. Mit Hilfe der Neutronenstreuung lässt sich die Struktur von Supraleitern detailliert bestimmen. Myonen können

komplementär dazu für die Messung von Magnetfeldern im Innern von Supraleitern eingesetzt werden. Myonen präzidieren in einem Magnetfeld analog wie ein Tischkreisel im Gravitationsfeld. Diese Eigenschaft benutzt man zur Messung von Magnetfeldern im Inneren eines Supraleiters (Abb. 27). Würde man hingegen in den Supraleiter ein Loch bohren, um eine Magnetsonde hineinstecken zu können, würde der Supraleiter im Lochbereich zerstört und die Magnetfeldmessung würde ausserhalb des Supraleiters stattfinden.

Raumtemperatur-Supraleiter würden ermöglichen:

- ▶ lautlos gleitende Magnetschwebebahnen
- ▶ verlustfreie Hochspannungsleitungen über Tausende von Kilometern
- ▶ elektronische Resonanzkreise höchster Güte
- ▶ ultrastarke kleine Elektromotoren und Magnete
- ▶ hocheffiziente Transformatoren oder Induktionsöfen

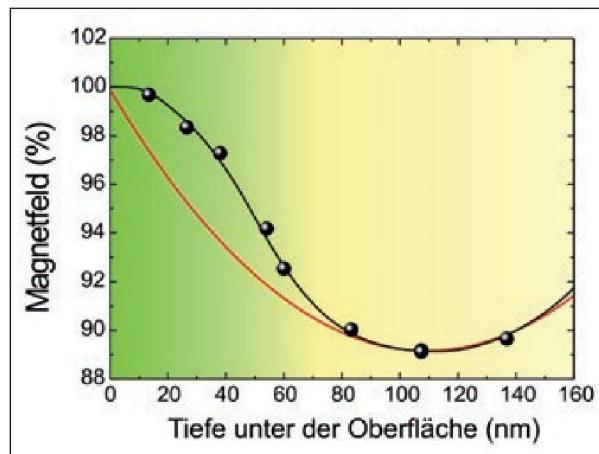


Abb. 27: Mit Myonen-Präzession gemessene magnetische Feldstärke im Inneren eines supraleitenden Films bis in eine Tiefe von 160 Millionstimmillimeter (nm). Die rote theoretische Kurve beschreibt den tatsächlichen Verlauf nur annähernd. Grafik: PSI.

Untersuchung winziger Magnetfelder für noch mehr Speicherplatz auf Festplatten

Obwohl der Magnetismus seit 3000 Jahren bekannt ist, sind immer noch grundlegende Fragen zu dessen Entstehung offen. Mit einem neuen Experiment an der SLS hat ein For-

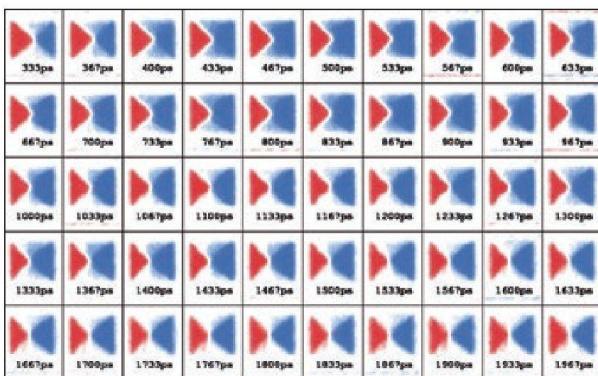


Abb. 28: Magnetische Domänen im Abstand von jeweils 33 Billionstel Sekunden nach der Anregung durch einen Magnetfeldpuls. Bild: PSI.

schungsteam die Ausrichtung von Magnetfeldern in Domänen von wenigen Tausendstel Millimetern Durchmesser sichtbar gemacht. Der dabei entstandene Super-Zeitlupenfilm (Abb. 28) zeigt die relaxierende Bewegung der magnetischen Domänen nach der Anregung durch einen Magnetfeldpuls mit einer zeitlichen Auflösung von 33 ps (Billionstelsekunden), was einer Bildrate von 30 Mia. Bildern pro Sekunde entspricht. Die dabei gewonnenen Resultate geben Aufschluss über die Kräfte zwischen den atomaren Magnethadeln und sind von Interesse für die Grundlagenforschung, aber auch für die Entwicklung von Computerfestplatten mit noch höherer Speicherdichte.

Viel Platz hat es noch im Nanokosmos?

Auf einer 1000 GByte Festplatte mit einem Durchmesser von 10 cm haben die Bits einen Abstand von rund 30 nm (Millions-telmillimeter). Ein Bit beansprucht demnach auf der Oberfläche der Festplatte die städtliche Anzahl von rund 100'000 Atomen. Dazu kommen noch hunderte bis tausende von Atomschichten in der Tiefe der Festplatte. Zusammengefasst heisst dies, dass wir immer noch Millionen von Atomen für die Codierung eines einzigen Bits verschwenden. Kein Wunder also, dass sich die Festplattenhersteller noch mit dauernd grösseren Kapazitäten überbieten können. Trotzdem wird ein ernst zu nehmendes Problem immer wichtiger: Je weniger Atome für die Codierung eines Bits verwendet werden, desto instabiler wird dieses gegenüber einem Umkippen¹ – mit fatalen Folgen für

die Zuverlässigkeit von Computern. Die PSI-Forschenden versuchen, neue stabile magnetische Strukturen zu finden, die weniger Atome benötigen. Dafür benötigen sie Grossanlagen wie die SLS, um beispielsweise das Umkippen einer 0 in eine 1 detailliert studieren und verstehen zu können.

Die weitere Entwicklung ist heute noch nicht abzusehen: Könnte man mit Quantencomputern sogar mehr Bits als Atome erreichen, und dies auch in der Tiefe eines Speichermediums, könnte die heutige jährliche Kapazitätszunahme von Speichermedien noch lange so weitergehen!

3.4 Projekte zum Thema Elementarteilchen

Am PSI hat sich über die vergangenen Jahrzehnte ein umfangreiches Wissen über die Technologie von Beschleunigern und Detektoren angesammelt, das weltweit grosse Beachtung findet. Dies hat zu einer wichtigen Zusammenarbeit mit dem CERN geführt. Dank dem grossen Fluss von Protonen und Neutronen können mit den Anlagen am PSI neben den anwendungsorientierten Projekten auch Untersuchungen durchgeführt werden, die in die Grundlagenforschung gehören, wie die genaue Bestimmung des Protonenradius oder des elektrischen Dipolmomentes des Neutrons. Für Anwendungen der Elementarteilchen in der Medizin sei auf Abschnitt 2 verwiesen.

Das Herz des CMS-Detektors am CERN stammt vom PSI

Das grösste physikalische Experiment aller Zeiten ist der *Large Hadron Collider* (LHC) am CERN bei Genf. In zwei Ringen mit 10 km Durchmesser werden Protonen gegenläufig auf die grösste je erreichte Energie von 7 TeV (TeV = Tera-Elektronenvolt = 10^{12} eV) beschleunigt. Die beiden Ringe kreuzen sich an vier Stellen, wo die Protonen frontal zusammenstossen, so dass die gesamte kinetische Energie E von 14 TeV neue Elementarteilchen entstehen lassen kann. Nach der Einstein'schen Formel $E = m c^2$ (c = Lichtgeschwindigkeit) ist die Summe der Massen aller produzierten Teilchen maximal m. Mit $E = 14$ TeV können Elementarteilchen mit insgesamt rund 10'000 Protonenmassen erzeugt werden, was ausreichen sollte, um das theoretisch vorhergesagte Higgs-Teilchen zu erzeugen. Dieses bisher noch nie beobachtete Teilchen mit dem assoziierten Higgs-Feld sorgt in der Standardtheorie dafür, dass die Elementarteilchen eine Masse haben. Die Erwartungen gehen aber weit über den Nachweis des Higgs-Teilchens hinaus. Die heutige Standard-Theorie kann nicht vollständig sein, weil sie von den vier Naturkräften nur drei beschreibt und die Gravitationskraft nicht erklären kann. Weiter haben die Astronomen während der letzten Jahrzehnte immer deutlicher verstanden, dass im Weltraum rund 25-mal mehr Masse und Energie existiert als wir bisher beobachteten konnten. Diese nur indirekt durch Gravitationswirkungen feststellbare dunkle Masse und dunkle Energie könnte mit einer völlig unbekannten Teilchenart zusammenhängen, die mit den bekannten 12 Bausteinen der Standard-Theorie nicht erklärt

1 Jedes Computerprogramm und alle Daten (Buchstaben, Zahlen, Bilder) auf einem Speicher bestehen aus langen Folgen von 0 und 1. Beispielsweise werden die Zahlen 1, 2, 3, 4 dargestellt als 0001, 0010, 0011, 0100. Jedes dieser Zeichen 0 oder 1 nennt man ein Bit. Kippt nun zufolge einer Instabilität die erste 0 von 0100 = 4 in eine 1 um, ergibt sich die Zahl 1100 = 12. Für einen Computer ist ein solches Ereignis ein fataler Fehler, der nicht vorkommen darf.



Abb. 29: Einbau des am PSI entwickelten Barrel-Pixel-Detektors in den riesigen CMS-Detektor des CERN im August 2008. Bild: Bramaz.

werden kann. Eine Erweiterung dieser Theorie würde vermutlich unser Verständnis des Universums, seiner Entwicklung und seiner Bausteine revolutionieren. Am CERN geht es also um grundlegende Fragen der Entstehung des Universums sowie der Natur der elementaren Bausteine.

Über ein Jahrzehnt wurde am PSI ein Detektor entwickelt, der der enormen Strahlenbelastung im Zentrum des CMS-Detektors (CMS = Compact Myon Solenoid, 15 m Durchmesser, 21 m lang, 12'500 Tonnen) standhalten und den hohen Anforderungen an Messgenauigkeit und -geschwindigkeit genügen kann. Im Sommer 2008 konnte der PSI-Barrel-Pixel-Detektor ins Zentrum des CMS-Detektors eingebaut werden (Abb. 29), wo er seither auf einer Temperatur von knapp zwei Grad über dem absoluten Nullpunkt (d.h. bei -271°C) gehalten wird. Glücklicherweise wurde er durch den nach der ersten Inbetriebnahme der Gesamtanlage eingetretenen Störfall nicht beschädigt und liefert zuverlässig Daten, die vielleicht einen Einblick in einige der grossen Geheimnisse des Universums gestatten werden.

Das Proton ist etwas kleiner als bisher angenommen

Im Gegensatz zum Elektron ist das Proton aus grundlegenden Elementarteilchen, den sog. Quarks zusammengesetzt, die sich in einem bestimmten, wenn auch sehr kleinen Raum bewegen. Die drei Quarks eines Protons tragen elektrische Ladungen, die durch deren Bewegungen auf diesen kleinen Raum verteilt werden. Als Protonenradius bezeichnet man den Radius dieser

Ladungsverteilung, der bekannt sein muss, um die Energieniveaus des Wasserstoffatoms mit hoher Genauigkeit bestimmen zu können. Über Jahrzehnte haben Physiker den Protonenradius immer genauer gemessen, indem sie untersucht haben, wie ein Elektronenstrahl in flüssigem Wasserstoff gestreut wird. Mit Hilfe einer der grundlegendsten physikalischen Theorien, der Quantenelektrodynamik (QED), haben theoretische Physiker auf der Basis von diesem Protonenradius die Energieniveaus des Wasserstoffatoms bestimmt, die man mit spektroskopischen Methoden messen kann.

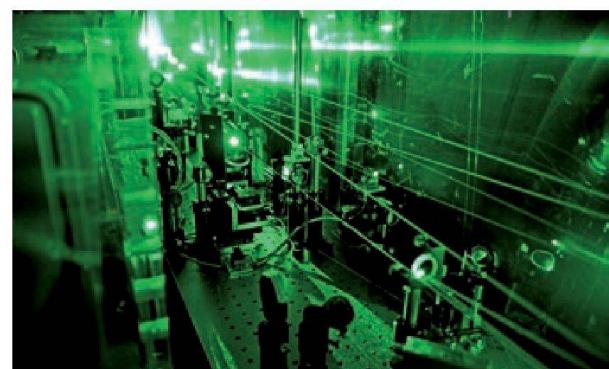


Abb. 30: Experiment zur Bestimmung des Protonenradius mit Hilfe von myonischem Wasserstoff. Bild: A. Antognini, PSI.

kopischen Methoden auch sehr genau messen kann. Aus der guten Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Energieniveaus schloss man, dass die QED korrekt sei.

Um die QED einem noch härteren Test auszusetzen, wurde am PSI eine lange Serie von Experimenten mit myonischem Wasserstoff durchgeführt (Abb. 30) mit dem Ziel, den Protonenradius noch genauer zu bestimmen. Myonischer Wasserstoff ist ein künstlich hergestelltes, exotisches Atom. Sein Kern ist ein gewöhnliches Proton, sein Elektron wird jedoch durch ein negatives Myon ersetzt, das rund 200 mal mehr Masse hat als ein Elektron. Dadurch bewegt sich das Myon viel näher am Proton und wird durch seinen Radius stärker beeinflusst als ein Elektron. Mit hochpräzisen spektroskopischen Messungen wurden am PSI die Energieniveaus von myonischem Wasserstoff bestimmt. Theoretische Physiker haben dieselben Energieniveaus mit der QED berechnet und dabei festgestellt, dass Rechnungen und Messungen nur dann gut übereinstimmen, wenn der Protonenradius um rund 4% kleiner gewählt wird als bisher angenommen. Dieses Resultat hat weltweit grosses Erstaunen und viele Nachrechnungen und Überprüfungen ausgelöst. Es ist heute nicht klar, wo die Diskrepanz herröhrt: Ist die QED zu korrigieren, ist das Experiment fehlerhaft, ist ein unbekannter Effekt verantwortlich für die Abweichungen? Die Zukunft wird zeigen, welchen Stellenwert dieses schwierige und spannende Experiment erhalten wird, dessen Entwicklung und Aufbau mehr als ein Jahrzehnt in Anspruch genommen hat.

4. Ausbildung und Kommunikation

4.1 Öffentlichkeitsarbeit

Dialog mit der Öffentlichkeit und Förderung des Interesses an Naturwissenschaft und Technik

Um den Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft zu fördern, eröffnete das PSI 1998 aus Anlass seines zehnjährigen Bestehens das *Besucherzentrum «psi forum»*. In einer permanenten Ausstellung werden vier Forschungsgebiete des Institutes *Mensch und Gesundheit, Energie und Umwelt, Nanowissenschaften, Elementarteilchen* mit Hilfe von interaktiven Exponaten verständlich gemacht. Weitere Publikumsmagnete sind die angebotenen 3D-Filme (Abb. 31 a), ein 5 m hoher evakuierbarer Fallturm und ein Fahrrad-getriebener Dynamo zur Stromerzeugung. Das auch sonntags geöffnete Besucherzentrum zieht jährlich um die 15'000 Interessierte verschiedenster Altersgruppen an.



Abb. 31 a: Das Besucherzentrum „psi-forum“ als Tor zur Öffentlichkeit: Mädchen am Tochtertag erwarten einen 3D-Film. Bild: PSI.



Abb. 31 b: Jugendliche an Schallexperimenten im Schülerlabor iLab. Bild: PSI.

Zum zwanzigjährigen Jubiläum des PSI wurde 2008 ein *Schülerlabor iLab* gegründet. Seither besuchen jährlich rund 200 Klassen mit 4000 Schülerinnen und Schülern das Schall- oder Vakuumlabor (Abb. 31 b). Mit verschiedenen Experimenten wird den Jugendlichen gezeigt, wie die Natur- und Ingenieurwissenschaften helfen, die Welt zu verstehen und dieses Wissen nutzbringend anzuwenden. Und es kommt bei der jungen Generation der 14 bis 15-jährigen gut an: über 80% finden die Experimente interessant und beurteilen den anschliessenden Rundgang in den Forschungsanlagen als spannend. Erstaunlich, dass sogar über die Hälfte von Physik fasziniert ist und ganz allgemein Forschung spannend findet! Die Kombination der Experimente mit den Erfahrungen der Jugendlichen sowie mit bekannten Phänomenen aus der Tierwelt und der Technik zeigt, dass Physik nicht trockene Theorie bedeutet, sondern verschiedenste Alltagserscheinungen miteinander verknüpft. Das iLab zeigt die zentrale Rolle der Naturwissenschaften für die Innovationskraft der Schweizer Industrie und motiviert, einen naturwissenschaftlichen Beruf oder ein naturwissenschaftliches Studium zu ergreifen.

Information für Bevölkerung, Medien und Politik

Zur Information der Bevölkerung werden periodisch *Tag der offenen Tür* durchgeführt, an denen bis zu 12'000 Personen die Anlagen und Labors besuchen und von den PSI-Fachleuten erklären lassen. Gut besucht sind auch *Abendveranstaltungen*, an denen Forschungsprojekte allgemeinverständlich erklärt werden und die entsprechenden Labors oder Grossanlagen besucht werden können.

Durch *Medienmitteilungen* und *Medienkonferenzen* werden sowohl Printmedien als auch Radio und Fernsehen über aktuelle Ereignisse und wissenschaftliche Durchbrüche informiert. Ein 1999 lancierter *Energie-Spiegel* beleuchtet wichtige Themen aus dem Energie- und Umweltsektor und dient Politikern und der interessierten Öffentlichkeit als Informationsbasis.

4.2 Ausbildung

Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

Entscheidend für den Erfolg des Institutes sind die Mitarbeitenden mit herausragenden Qualifikationen, Erfahrungen und Motivation, die «Köpfe hinter den Maschinen». Deshalb ist Ausbildung ein wichtiges Thema. Bereits Kantonsschülerinnen oder Gymnasiasten können am PSI Praktikums- oder Maturaarbeiten durchführen. Für Studierende besteht die Möglichkeit, Bachelor-, Master-, Diplom- und Promotionsarbeiten an einer der grossen Forschungsanlagen oder in Labors des PSI zu absolvieren. 2008 arbeiteten 305 Doktorierende am PSI (Abb. 32). Ihre Grundausbildung haben die jungen Forschenden vor allem in Physik, Chemie und den Ingenieurwissenschaften absolviert. Die meisten an den ETH Zürich und Lausanne, den Universitäten Zürich und Bern sowie im Ausland. Die PSI-Forscher engagieren sich jedoch nicht nur vor Ort in der Aus-

bildung von Studierenden. Über 80 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben einen Lehrauftrag an einer Schweizer Hochschule oder Fachhochschule übernommen und unterrichten den Forschungsnachwuchs direkt im Hörsaal. Zudem nimmt das PSI jeden Sommer über 50 Studentinnen und Studenten aus aller Welt für ein 2- bis 4-monatiges Praktikum auf. Die jungen Forschenden können so erste Berufserfahrungen sammeln sowie Kontakte knüpfen, die für deren weitere Laufbahn entscheidend sein können.

Ausbildung von Lernenden in 13 Berufen

Ein Institut, das Spitzenforschung betreiben will, braucht auch hervorragende Berufsleute, die den Betrieb eines Forschungsinstituts erst möglich machen. Die vielseitigen Arbeiten im Institut erlauben es, Lernende in den verschiedensten Berufen auszubilden. Derzeit werden rund 80 Lernende in 13 Lehrberufen ausgebildet. Die Berufsausbildung findet in einer Hochtechnologie-Umgebung statt, in der die Lernenden möglichst an echten Aufträgen ausgebildet werden.

Frauenförderung

Einschlägige Studien haben ergeben, dass spätestens nach der Promotion zahlreiche hochqualifizierte Wissenschaftlerinnen und Ingenieurinnen ihre Karriere (vorerst) nicht weiterverfolgen. Als Brückenschlag hat sich das PSI dazu verpflichtet, junge motivierten Frauen, die den Wiedereinstieg in anspruchsvolle Aufgabenbereiche nach einer familienbedingten Pause suchen, gezielte Einarbeitungs- respektive Qualifikationsmöglichkeiten anzubieten. Damit sollen die Karrierechancen von Frauen in Forschung und Technik verbessert werden. Die Massnahme hat sich als Erfolg erwiesen und ist nun fester Bestandteil der Personalpolitik.

4.3 Reaktor- und Strahlenschutzschule

Die *Reaktorschule* ist eine Höhere Fachschule für Technik mit einem eidgenössisch anerkannten Abschluss als Diplom-Techniker HF. Ihr hauptsächliches Tätigkeitsfeld ist die theoretische Grundausbildung von lizenziertem Betriebspersonal für Kernkraftwerke. Neben dieser Grundausbildung werden auch Kurse angeboten, die entweder vertiefte Kenntnisse in der Kerntechnik vermitteln oder einen Überblick über die theoretischen Grundlagen und den Aufbau der Kernkraftwerke geben.

Im Auftrag verschiedener Bundesbehörden vermittelt die *Schule für Strahlenschutz* den verantwortungsvollen Umgang mit ionisierender Strahlung. Sie besitzt das schweizerische Qualitätszertifikat für Weiterbildungsinstitutionen und bietet Personen, die mit ionisierender Strahlung oder radioaktivem Material arbeiten, Grund- und Weiterbildungskurse an. Angesprochen sind insbesondere das Strahlenschutzpersonal in Kernanlagen, Röntgenassistentinnen und Personen in militärischen und zivilen Notfallorganisationen.



Abb. 32: Der swisselectric research award 2010 geht an den Chemiker Andreas Hintennach vom PSI. Dank seiner Doktorarbeit werden Lithiumionen-Batterien in Zukunft deutlich langlebiger sein. Bild: PSI.

5. Das PSI als Kompetenz- und Innovationszentrum

5.1 Kompetenzzentrum Energie und Mobilität CCEM – vernetzte Forschung

«Hierzulande musst du so schnell rennen wie du kannst, wenn du am gleichen Fleck bleiben willst», sagt die Rote Königin der erstaunten Alice in Lewis Caroll's Kindergeschichte «Alice im Wunderland». Ähnlich könnte es der Menschheit im Energie- und Klimabereich ergehen, wobei wir in diesem Fall nicht rennen, sondern mehr forschen müssen. Der ETH-Rat hat daher 2006 das Kompetenzzentrum Energie und Mobilität (CCEM) ins Leben gerufen, das die Energieforschung des ETH-Bereichs unter Einbezug der Fachhochschulen

Ziele des CCEM

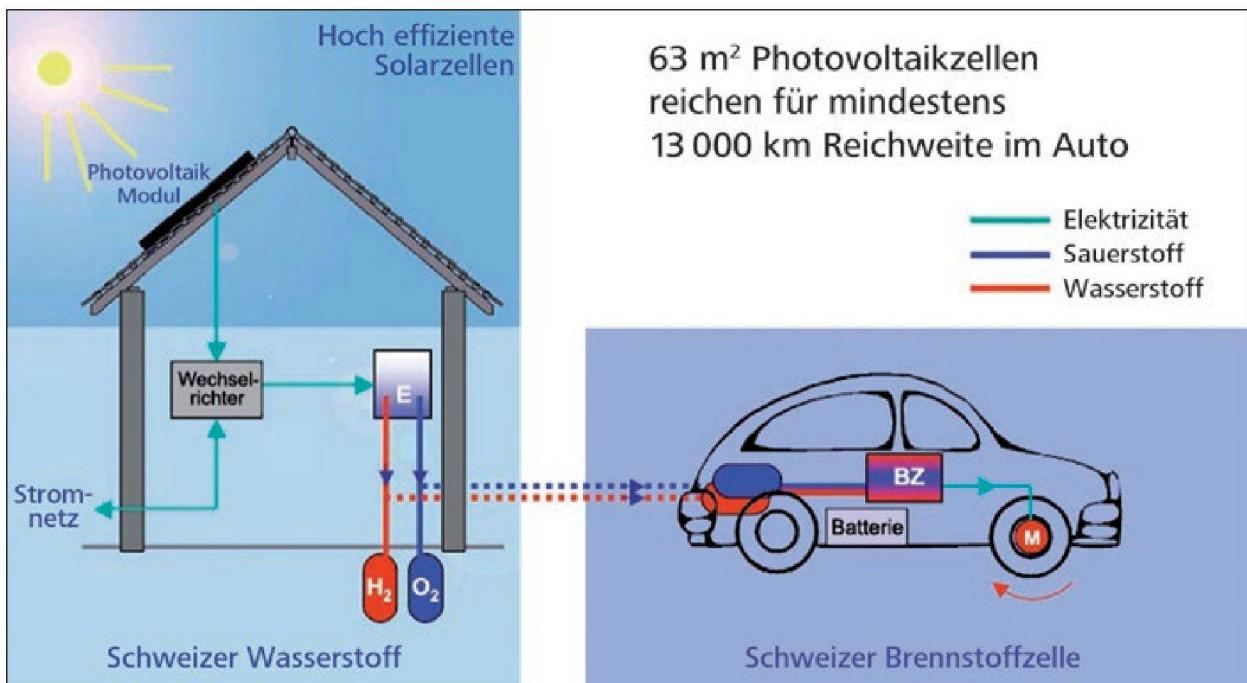
- ▶ Ersatz fossiler Brennstoffe durch alternative Treibstoffe wie CO₂-neutral produzierten Wasserstoff
- ▶ Effizienzsteigerungen bei der Energieproduktion, bei Materialien und den Prozessen (z.B. Verbrennung)
- ▶ Reduktion der Nachfrage nach Energiedienstleistungen

und Universitäten bündeln und daraus entstehende Anwendungen zusammen mit der Industrie fördern soll. Das vom

PSI geführte CCEM hat sich drei übergeordnete Ziele für ein künftiges Energiesystem der Schweiz gesetzt: Erstens muss der Ausstoss des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) gesenkt, zweitens soll die Abhängigkeit von Erdöl minimiert und drittens sollen diese Ziele ohne wesentliche Einbussen beim Wohlstand erreicht werden. Beabsichtigt ist eine Gesellschaft, die deutlich weniger Energie braucht. Eine wesentliche Reduktion ohne Komforteinbuße ist auf lange Sicht möglich, dies jedoch nur, wenn die vorhandenen Ressourcen effizienter genutzt und in allen Bereichen die neusten Technologien angewandt werden.

Brennstoffzellen für saubere Mobilität

Das PSI hat zusammen mit der *Belenos Clean Power Holding AG* eine Vision (Abb. 33): Rund 60 m² Solarzellen auf dem Hausdach eines Einfamilienhauses produzieren 30% des in diesem Haushalt verbrauchten Stromes und stellen mittels Elektrolyse genügend Wasserstoff und Sauerstoff her, dass ein Brennstoffzellenauto jährlich 13'000 km fahren kann. Der grösste Teil der Schweizer Personenwagen würde mit dieser Fahrleistung auskommen und dies ohne jemals an einer Tankstelle zu fahren! Mehr noch: Da in den Brennstoffzellen Wasserstoff und Sauerstoff zu reinem Wasser synthetisiert werden, wobei elektrischer Strom entsteht, entweicht aus dem Auspuff reiner Wasserdampf. Weiter macht der elektrische Antriebsmotor eines solchen Autos keinen Lärm. Dass dieser Traum realisierbar ist, bestätigen Vorversuche mit einem derartigen System,



das in Fribourg durch den Pneuhersteller *Michelin* bereits 2005 aufgebaut und mit dem Michelin-PSI-Brennstoffzellenfahrzeug Hy-Light getestet wurde. Mit einer gemeinsamen Anstrengung der CCEM-Partner und *Belenos* wird angestrebt, eine nachhaltige und umweltverträgliche individuelle Mobilität basierend auf einheimischer Energie zu realisieren.

5.2 Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaften

Das Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaften (ZRW) wird gemeinsam getragen vom PSI, der ETH Zürich und dem Universitätsspital Zürich. Es ist ein wichtiger Motor für Lehre, Forschung und Entwicklung neuer radioaktiver Medikamente in der Schweiz. Diese leisten einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung von Diagnostik und Therapie verschiedener Erkrankungen.

Im Juli 2010 wurde die erste Patientendosis ^{90}Y -Zevalin[®] (^{90}Y steht für das radioaktive Isotop des Elementes Yttrium) am PSI hergestellt und im Kantonsspital Luzern einem Patienten verabreicht. In aktuellen Studien wurde gezeigt, dass das Medikament mit dem Namen ^{90}Y -Zevalin[®], zu einer signifikanten Verlängerung der Lebenserwartung bei bestimmten Krebspatienten führt. Gleichzeitig wird ihre Lebensqualität während der Therapie nicht verschlechtert, da kaum Nebenwirkungen auftreten. Die Wirkung des Medikaments beruht auf einer starken Anreicherung der radioaktiven Substanz ^{90}Y im Tumor. Diese erzeugt ionisierende Strahlung, die Krebszellen abtöten kann. Die Halbwertszeit von ^{90}Y beträgt nur 2.5 Tage, weshalb das Medikament nicht auf Vorrat gehalten werden kann und für jeden Patienten frisch zubereitet werden muss.



Abb. 34: Eine Laborantin steuert mittels eines Manipulators die Abläufe im Inneren einer mit Blei abgeschirmten Kammer, in der das radioaktive Medikament ^{90}Y -Zevalin[®] hergestellt wird. Bild: PSI.

Die Zubereitung von Zevalin erfolgt am PSI in speziellen Kammern, deren Bleiwände die Mitarbeitenden vor der ionisierenden Strahlung des Ytriums schützen (Abb. 34). Das Laborpersonal benutzt Manipulatoren, mit denen die Arbeiten im Inneren der Kammer ferngesteuert ausgeführt werden können. Dank dieses «Hotlabor» können auch grössere Mengen des Medikaments ohne Gefährdung der Mitarbeitenden hergestellt werden. Die fertigen Patientendosen werden anschliessend an die einzelnen Spitäler ausgeliefert. Neben Luzern werden auch die Kantonsspitäler in Aarau, Olten und St. Gallen sowie die Klinik Genolier bei Nyon beliefert. Durch die zentrale Herstellung und den damit verbesserten Zugang zu diesem hochwirksamen Medikament möchte das PSI einen Beitrag zu einer noch besseren Behandlung von Krebspatienten in der Schweiz leisten.

5.3 Spin-off Firmen beleben die Wirtschaft durch Innovationen

Angewandte Forschung wird erst relevant, wenn die gewonnenen Erkenntnisse umgesetzt werden und in Produkte einfließen. Entscheidend dabei ist die Zeit, die zwischen einer Entdeckung und ihrer Anwendung verstreicht. Um den Wissenstransfer von der Forschung in die Industrie oder in KMU zu beschleunigen, wurde am PSI eine Technologietransfereinstellung installiert. Ihre Aufgabe ist es, Erkenntnisse mit Anwendungspotenzial innerhalb des PSI aufzuspüren und Kontakte zu Firmen herzustellen, die daran interessiert sein könnten. Durch eine enge Zusammenarbeit mit dem Technopark Aargau konnte die Sichtbarkeit des industriellen Potenzials am PSI noch erhöht werden. Im Folgenden wird eine Auswahl von erfolgreichen Spin-off Firmen des PSI vorgestellt.

EULITHA AG entwickelt und produziert mit Hilfe von interferierenden Röntgenstrahlen periodische, extrem kleine und dichte Nanostrukturen mit bis zu 15 Nanometer kleinen Details. Diese Herstellungstechnologie ist einsetzbar für die Massenproduktion zum Beispiel von Computer-Festplatten mit 100-mal grösserer Speicherkapazität gegenüber dem heutigen Stand der Technik oder von metallischen Nanostrukturen für Farbdisplays.

DECTRIS AG hat die am PSI entwickelte und patentierte Technologie des single-photon-counting für Röntgendetektoren übernommen und entwickelt und produziert Detektoren in verschiedener Konfiguration für Forschungs- und Laborzwecke (Abb. 35). Die Firma gewann den Swiss Economic Award 2010, die prestigeträchtigste Auszeichnung für Start-ups in der Schweiz, die von einer hochkarätigen Jury mit einem grossen Aufwand beurteilt werden. Seit der Gründung konnte sich die Firma im weltweiten Markt der Synchrotronquellen sehr gut entwickeln und hat 2010 den Mitarbeiterbestand auf 35 hochqualifizierte Personen erhöhen können.

Expose GmbH bietet Firmen und Organisationen aus dem pharmazeutischen und biotechnologischen Umfeld Dienstleis-

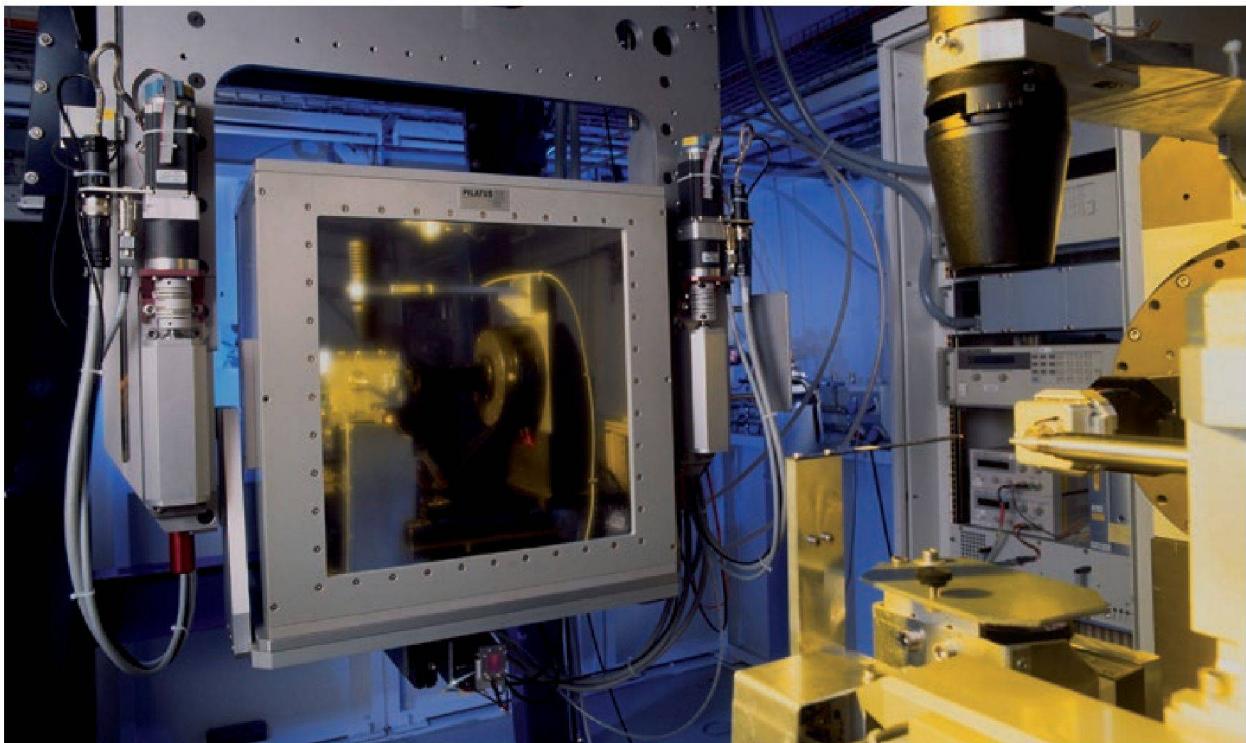


Abb. 35: Prototyp des Röntgendetektors PILATUS 6M der Firma DECTRIS AG in einer SLS PX-Strahllinie für Protein-Strukturanalyse. Bild: PSI.

tungen rund um die Proteinkristallographie an. Die Firma organisiert die Messzeiten an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) und führt die entsprechenden Analysen aus. Unterstützung bei der Auswertung runden das Angebot ab.

SwissNeutronics stellt die am PSI entwickelten Neutronen-Spiegel her und liefert damit Forschungslabors auf der ganzen Welt. Neutronen können wie Photonen nicht mit Magnetfeldern oder elektrischen Feldern von einer Quelle zu den Experimenten geführt werden. Ähnlich wie Licht in Leitern, können Neutronen in Spiegelkanälen geführt werden. Die dabei verwendeten Spiegel bestehen aus einer Vielzahl von sehr präzise gefertigten dünnen Schichten verschiedener Materialien.

5.4 Enge Beziehungen zwischen PSI und FHNW Brugg-Windisch

Die örtliche Nähe der beiden Institute eröffnet zahlreiche Möglichkeiten für Synergien. So können Forschende des PSI ihr Wissen in verschiedenen technischen Bereichen an die Studierenden der Fachhochschule weitergeben. Weiter können sich die unterschiedlich ausgerüsteten Labors innerhalb gemeinsamer

Projekte ergänzen. Ein Beispiel dafür ist das *Institut für nanotechnische Kunststoff-Anwendungen (INKA)*. Der Schwerpunkt seiner Forschungstätigkeit erstreckt sich auf die Funktionalisierung von Kunststoffen durch mikro- und nanostrukturierte Oberflächen (Abb. 36) oder durch nanoskalige Additive. Im

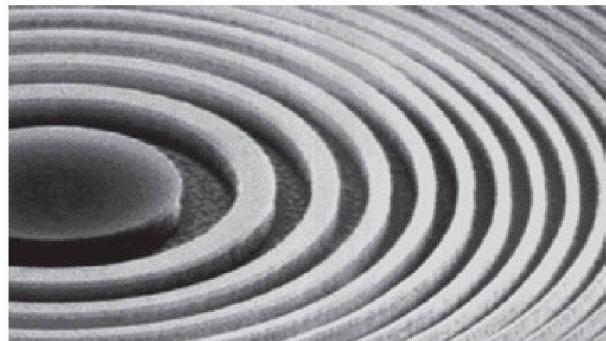


Abb. 36: Master-Struktur eines nano-optischen Elementes (Fresnel'sche Zonenplatte). Die Breite der äußersten Gräben beträgt 40 nm. Zum Vergleich: Die Wellenlänge von rotem Licht ist 600 nm. Bild: PSI.

Rahmen der Forschungs- und Dienstleistungsprojekte wird INKA durch die Kompetenzen und Einrichtungen sowohl des Institutes für Kunststofftechnik der FHNW als auch des PSI unterstützt. Dadurch profitieren beide Forschungspartner von einer einzigartigen Kombination von Wissen in Mikro- und Nanotechnologie sowie Kunststofftechnik. Dieser interdisziplinäre Ansatz drückt sich auch in den unterschiedlichen Fachkompetenzen der Mitarbeiter aus: Ingenieure, Physiker, Chemiker und Techniker arbeiten eng in den Projekten zusammen. In der Ausbildung kommen die Studierenden mit diesem sehr schnell wachsenden Hochtechnologie-Gebiet in Kontakt und profitieren von der engen Vernetzung mit dem PSI und dem Swiss Nanoscience Institute an der Universität Basel.

6. Ausblick – die Zukunft des PSI hat bereits begonnen

Das PSI möchte seinen Platz als Forschungsinstitut von Welt- rang beibehalten. Dies bedingt eine langfristige Planung und gewichtige Investitionen in neue Grossanlagen. Unter anderen Initiativen sollen hier das Projekt SwissFEL und die geplante Hightech-Zone beleuchtet werden.

6.1 Der Röntgenlaser SwissFEL – brillantes Licht für die Forschung der Zukunft

Im 18. und 19. Jahrhundert wurde klar, dass alle uns umgebenden Stoffe aus einer begrenzten Anzahl verschiedener Atome zusammengesetzt sind. Die wichtigsten Materialien, Nährstoffe und biochemischen Reaktionen betreffen nur rund 20-30 Atomarten, die alle durch die moderne physikalische Quan-

tentheorie detailliert beschrieben und berechnet werden können. Mit dieser Handvoll Atome lassen sich eine unüberschaubare Vielfalt kleiner einfacher aber auch sehr grosser komplexer Moleküle zusammenbauen. Die Chemiker haben ein riesiges Wissen sowohl über die Struktur als auch über die Herstellung solcher Moleküle angesammelt. Durch viele erfolgreiche Versuche und noch mehr Fehlschläge haben die Forscher Küchenrezepte gefunden, um selbst sehr komplizierte Moleküle technisch nachzubauen. Ein bis heute unerfüllter Traum ist jedoch der, hinter das Küchenrezept schauen zu können. Man möchte verstehen, was sich beim Übergang von den Edukten zu den Produkten abspielt. Einfach ausgedrückt: Kann man dem Tanz der Atome während einer chemischen Reaktion zusehen? Meistens kann eine chemische Reaktion durch einen Katalysator beschleunigt oder sogar erst ermöglicht werden. Eigenartigerweise werden Katalysatoren bei der Reaktion nicht verbraucht, nehmen aber doch ganz zentral daran teil. Stellen Sie sich vier Personen als Atome (Edukte) vor, die zu einem Endprodukt (Molekül) gemäss nebenstehendem Bild (Abb. 37) synthetisiert worden sind. Die heutigen Chemikerinnen und Chemiker können Edukte und Produkte genau analysieren, fragen sich aber, wie der Übergang zu schaffen ist und auf welche Weise ein Katalysator dabei helfen kann. Die abgebildete menschliche Brücke ist einfach zu schaffen, wenn sich die vier Personen anfänglich auf vier Stühle (Katalysator) setzen und sich dann auf die Knie der jeweils nächsten Person ablegen, so dass die Stühle wieder weggenommen werden können (der Katalysator in der Form von Stühlen wird nicht verbraucht). Um derartige katalytische Prozesse verstehen zu können, will man am PSI den Vorgang von den Edukten zu den Produkten filmen. Eine dafür taugliche Filmkamera muss aber fast unvorstellbare Bedingungen erfüllen: Sie soll die Atome scharf abbilden können und dazu so schnell, dass während der katalytischen Reaktion mehrere Bilder entstehen. Glücklicherweise kann man bereits mit heutigen Systemen einzelne dieser Bedingungen erfüllen, aber nicht alle gleichzeitig. So können mit der SLS Atome genügend scharf abgebildet werden, doch ist die Belichtungszeit etwa 1000 mal länger als die chemische Reaktion dauert und die sich bewegenden Atome ergeben



Abb. 37: Menschliche Brücke, die mit Hilfe von Stühlen als «Katalysator» erstellt werden kann. Foto: PSI.

Visionen des PSI

Bis zum Jahr 2020 möchten wir

- ▶ viele und kostengünstige Elektroautos sehen
- ▶ im Gasnetz Methan aus Holz von Schweizer Wäldern haben
- ▶ chemische Reaktionen filmen, um Katalysatoren genauer zu verstehen und mit diesem Wissen zu verbessern
- ▶ einzelne Proteinmoleküle fotografieren und damit zur Entwicklung neuer Medikamente beitragen
- ▶ das ultraschnelle Umschalten magnetischer Domänen (Bits) beobachten, um die Speicherdichte von Festplatten zu erhöhen
- ▶ Supraleiter finden, die bei normalen Temperaturen funktionieren
- ▶ eine pulsierende High-Tech-Zone auf unserem erweiterten Areal haben

verschwommene Bilder. Mit Hilfe von Lasergeräten können so kurze Blitze erzeugt werden, dass während des Reaktionsablaufes mehrere Bilder geschossen werden können. Leider sind die Wellenlängen solcher Laser viel grösser als die Atome, so dass diese nicht sichtbar werden.

Ein Röntgenlaser kombiniert die Vorteile der SLS (kleine Wellenlänge) mit denjenigen eines Lasers (kurze Blitze), so dass atomare Vorgänge im Femtosekunden-Bereich gefilmt werden können. Wie enorm die Herausforderung an den am PSI in der Entwicklung stehenden Röntgenlaser SwissFEL (Swiss Free Electron Laser) tatsächlich ist, wird aus folgenden Überlegungen verständlich: Die Belichtungszeit soll etwa 10 Femtosekunden betragen, d.h. der hundertste Teil eines Millionstel einer Millionstelsekunde, d.h. 10^{-14} s. In diesem kurzen Zeitintervall bewegt sich ein Lichtstrahl gerade mal 3 Tausendstelmillimeter vorwärts. Vielleicht noch eindrücklicher: Der SwissFEL muss rund eine Million mal schneller sein als Lucky Luke, der Mann, der schneller den Revolver zieht als sein Schatten! (Abb. 38) Die geplante 700 m lange Maschine soll alle geforderten Eigenarten erfüllen. Die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind überzeugt, dass das System wie vorgesehen funktionieren wird, weil mit der erfolgreichen Inbetriebnahme der SwissFEL-Injektor-Testanlage am 24. August 2010 durch Bundesrat Didier Burkhalter der Beweis erbracht wurde, dass das PSI-Konzept umgesetzt werden kann (Abb. 39). Der



Abb. 39: 60 m lange Testanlage für die erste Beschleunigungsstufe des SwissFEL: Die ersten 20 cm sind entscheidend für die Qualität der 700 m langen Gesamtanlage. Bild: PSI.

Bau der Gesamtanlage wird sich über mehrere Jahre erstrecken, so dass mit einer Inbetriebnahme des rund 280 Mio. Franken teuren SwissFEL im Jahre 2016 gerechnet werden kann. Die Anforderungen an die mechanische Präzision der Bauteile, die Stabilität der Hochfrequenz-Komponenten und die Qualität des Vakuums sind hart an der Grenze dessen, was die modernsten verfügbaren Technologien leisten können: eine Herausforderung für das PSI und die Schweizer Industrie, mit der das Institut eng zusammenarbeitet.



Abb. 38: Lucky Luke, der Mann, der schneller zieht als sein Schatten, muss rund eine Million mal schneller den Revolver ziehen, als die Verschlusszeit einer Kamera beträgt. Der SwissFEL muss nochmals eine Million mal schneller sein als Lucky Luke! Bild: walz 2 consult, Überlingen (D); Copyright Lucky Comics.

6.2 Eine Hightech-Zone als Innovationsmotor für die Wirtschaft

Mit der Initiierung der Hightech-Zone Villigen (HTZ) möchte das PSI seine Kontakte und den Austausch mit der Hightech-Industrie verstärken (Abb. 40). Insbesondere bei gemeinsamen Forschungsprojekten soll durch kurze Wege die Qualität der Zusammenarbeit verbessert und der Wissensaustausch effizienter werden. Die räumliche Nähe soll den eingemieteten Firmen der HTZ erlauben, die am PSI vorhandenen Kompetenzen in verschiedenen Fachgebieten von Wissenschaft und Technik besser zu erschliessen. Damit will das PSI einen Beitrag zur Stärkung der Innovationskraft in der Schweiz leisten.

Die HTZ Villigen ist der ideale Standort für verschiedene Arten von Unternehmen, die im Technologieumfeld tätig sind. So findet hier nationale und internationale Hightech-Industrie die Möglichkeit, mit dem PSI technisch und wissenschaftlich zu kooperieren, sei es in Infrastrukturprojekten (z.B. Technologieentwicklung und Zusammenarbeit beim SwissFEL-Projekt) oder aber in Forschungsprojekten. Die HTZ bietet im Weiteren für Unternehmen optimale Bedingungen, die Grossforschungsanlagen des PSI als Dienstleistung nutzen wollen (beispielsweise für Analysen an den Strahllinien der SLS). Offensichtlich ideal

ist der Standort in der HTZ für Spin-off Firmen, die aus der Forschung am PSI hervorgehen. Für diese Unternehmen ist dank der HTZ weiterhin ein direkter Zugang zu den Forschungsanlagen gewährleistet. Mit diesen verschiedenen Unternehmen bildet sich ein Know-how-Pool mit einem riesigen Innovationspotenzial mit vielfältigen Anknüpfungspunkten für die Unternehmen in der HTZ.

Mit der HTZ Villigen wird auch die Attraktivität des Kantons Aargau für hochqualifizierte Firmen gesteigert. Weiter wird damit die heute schon enge Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW in Brugg-Windisch vertieft, die ihrerseits einen neuen Campus und einen Technopark Aargau entwickelt. Die Region Brugg wird durch diese Konzentration von Ausbildung, Wissen und dessen Anwendung zu einem Brennpunkt für Forschung und Innovation mit schweizerischer und internationaler Ausstrahlung.



Abb. 40: Die geplante 38 000 m² grosse Hightech-Zone in Villigen. Bild: PSI.

Literatur

Auf der Homepage des PSI <http://www.psi.ch> unter *Informationsmaterial* finden sich weitergehende Informationen. Insbesondere können Broschüren über die Grossanlagen und grössere Forschungsprojekte sowie Jahresberichte und Energiepiegel heruntergeladen werden. Druckexemplare können via das *Bestell-Center* elektronisch bestellt werden. Viele Broschüren liegen auch im Besucherzentrum *psi forum* auf.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Fritz Gassmann, Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI
fritz.gassmann@psi.ch

