



PAUL SCHERRER INSTITUT



# Fenster zur Forschung





# Inhalt

|         |                                                                      |
|---------|----------------------------------------------------------------------|
| 5       | Auf der Schlussgeraden                                               |
| 6 / 7   | In Kürze:<br>Der Weltraum<br>Benzin<br>Laser im Chip<br>Montage frei |
| 8 / 9   | Die richtige Haut                                                    |
| 10 – 12 | Protonen gegen Tumore                                                |
| 13 – 15 | Gemeinsam statt einsam                                               |
| 16 / 17 | Endlich einmal dabei sein                                            |
| 18 / 19 | Wettkampf um fantastische Wirbel                                     |
| 20 / 21 | Die Grossforschungsanlagen des PSI                                   |
| 22 / 23 | Das PSI ist ein Nutzerlabor                                          |
| 24 / 25 | Die Forschungsschwerpunkte des PSI                                   |
| 26      | Das PSI im Überblick                                                 |
| 27      | Impressum                                                            |



# Auf der Schlussgeraden

**Sehr geehrte Leserin  
Sehr geehrter Leser**

Ein grosses Infrastrukturprojekt zu verwirklichen ist stets eine grosse Herausforderung – erst recht, wenn es sich dabei um den Aufbau einer Grossforschungsanlage handelt.

Die besondere Herausforderung dabei ist, dass Menschen eng zusammenarbeiten müssen, die zum Teil für sehr verschiedene Arbeitskulturen stehen: Etwas überspitzt betrachtet gibt es auf der einen Seite die Wissenschaftler, die die Anlage entwerfen – Menschen, die gewohnt sind, in neue Welten vorzustossen, in einem kreativen Chaos zu arbeiten, visionär denkend und bereit, sich auf risikoreiche Projekte mit einem Zeit-

horizont von mehreren Dekaden einzulassen. Auf der anderen Seite stehen in der Regel durchorganisierte Industrieunternehmen, die die Anlagen umsetzen. Sie sind auf eine stabile Auftragslage angewiesen, die Arbeitsplätze sichert, und müssen bei ihren Entscheidungen stets eine geschickte Balance zwischen kurz-, mittel- und langfristigen Überlegungen finden.

Dabei geht es mir nicht darum zu werten, denn beide Ansätze haben ihre Daseinsberechtigung und haben – gerade in der Schweiz – gezeigt, wie erfolgreich sie sein können.

Die Bedürfnisse wissenschaftlicher Kreativität und industrieller Produktivität auszubalancieren ist für grosse wissenschaftliche

Projekte die wichtigste Herausforderung. Leider haben in der letzten Zeit immer wieder internationale Grossforschungsanlagen schwere Verzögerungen erlitten – meist wegen einer unkontrollierten Kostenexplosion, manchmal als Folge unklarer Projektsteuerung.

Dagegen ist das SwissFEL-Projekt im Zeit- und Kostenplan. Das liegt einerseits an dem Knowhow und der Motivation der PSI-Mitarbeitenden, andererseits aber auch an der aussergewöhnlichen Kompetenz und dem Engagement unserer Industriepartner.

Natürlich treten in jedem Projekt dieser Grösse Spannungen und Missverständnisse zwischen den Kooperationspartnern oder Verzögerungen auf. Da ist es entscheidend, dass die Beteiligten zusammenkommen und sich über die Gründe für die Situation klar werden: Hat man es mit einem kurzfristig lösbaren Problem zu tun oder mit einem grundsätzlichen?

Das SwissFEL-Team, das aus Vertretern des PSI und der Industrie besteht, musste sich bisher nur mit kurzfristig lösbaren Problemen auseinandersetzen. Das SwissFEL-Projekt ist nun auf der Schlussgeraden und wir sind überzeugt, dass wir unser Ziel erreichen werden, Ende kommenden Jahres den ersten Strahl zu erzeugen und 2017 die ersten Nutzer begrüssen zu können.

Professor Dr. Joël Mesot  
Direktor Paul Scherrer Institut

## Der Weltraum

...unendliche Weiten. Wir schreiben das Jahr 2015. Die Abenteuer der Crew des Raumschiffs Enterprise werden erst in etwa 185 Jahren beginnen. Doch schon heute tummeln sich im Kosmos Raumflugkörper aller Art. Und alle sind der kosmischen Strahlung ausgeliefert. Diese ist für die komplexen mikroelektronischen Bauteile an Bord gefährlich. Ein Ausfall der Geräte könnte katastrophale Folgen haben. Deshalb lässt die Europäische Weltraumorganisation ESA ihre Raumfahrtkomponenten intensiven Prüfungen unterziehen bevor sie eingesetzt werden. Dabei helfen ihr auch die Wissenschaftler am PSI. Sie nutzen den supraleitenden PSI-Beschleuniger



Schon seit 2008 unterwegs mit PSI-Technologie an Bord: Der GIOVE-B-Satellit des ESA-Navigationssystems GALILEO: <http://psi.ch/SX5F> (Quelle: ESA/GALILEO). Das PSI-Video zum Thema: <https://youtu.be/elmxwAXcb44>

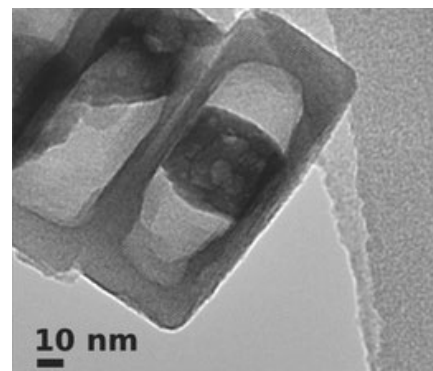
COMET, um Elektronikteile mit Protonen zu beschliessen, aus denen die kosmische Strahlung überwiegend besteht.

Für den Beschleuniger ist das eigentlich nur ein «Nebenjob»: seine Hauptaufgabe ist, Protonen zur Behandlung von bestimmten Krebserkrankungen am Zentrum für Protonentherapie des PSI zur Verfügung zu stellen. Wenn er dafür nicht gebraucht wird, lenken die Forscher die Protonen zu einem präparierten Messplatz um, wo sie auf eingespannte Elektronikteile einprasseln. Wissenswert ist, nach welcher Strahlendosis sie noch zuverlässig funktionieren.

Wenn die Forscher nicht messen, entwickeln sie Detektoren, die an Bord künftiger Raumgeräte die Strahlung messen werden. So auch für die ESA-Mission zu den Jupiter-Monden, die 2022 starten wird.

## Benzin

Forschenden des PSI und der ETH Zürich ist es gelungen, ein Material im Labor herzustellen, mit dem man eines Tages Benzin und Diesel kostengünstiger und nachhaltiger als heute aus Rohstoffen wie Holz, Klärschlamm oder Gülle erzeugen könnte. Ein solches alternatives Verfahren gibt es schon seit 1925, es ist aber bislang teurer als die konventionelle Gewinnung aus Erdöl. Die Wissenschaftler veränderten gezielt nanometerkleine, poröse Zeolithkristalle so, dass darin zwei der Umwandlungsschritte bei der Herstellung von Kohlenwasserstoffen



Mit einem Elektronenmikroskop konnten die Wissenschaftler dieses Bild ihrer ausgehöhlten Zeolith-Nanokristalle mit Kobaltkugeln (dunkler Fleck) im Hohlraum aufnehmen. (Quelle: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Abdruck mit Genehmigung.)

ablaufen können. Dadurch könnten diese zwei Schritte, für die bisher zwei Behälter nötig sind, künftig in einem einzigen Behälter stattfinden, was Kosten sparen würde. Das neue Material erhielten die Forschenden, indem sie die Zeolith-Nanokristalle mit einer ätzenden Lösung aushöhlten und in die Hohlräume winzige Kügelchen aus Kobalt einbrachten, wie sie schon heute bei der industriellen Herstellung synthetischer Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Die Kobaltkugeln unterstützen in einem ersten Schritt die Herstellung einer Mischung aus Kohlenwasserstoffen, die auch Bestandteile von Benzin enthält. Diese Mischung wird dann in einem zweiten Schritt, ebenfalls in den Nanokristallen, von unerwünschten Kohlenwasserstoffen bereinigt, indem diese zum Teil auch in Benzinkomponenten umgewandelt werden.



## Laser im Chip

Laser, die so winzig sind, dass sie in einem Computerchip Platz finden, dürften in Zukunft unsere Computer noch schneller machen. Über sie könnten verschiedene Komponenten innerhalb des Chips Informationen mit Lichtstrahlen austauschen statt mit elektrischem Strom. Das wäre schneller, weil das Licht viele Daten gleichzeitig transportieren kann, die man durch die heute genutzten Kupferleitungen nacheinander schicken muss. Zudem braucht es zum Transport von Licht weniger Energie, wodurch sich der Chip weniger erwärmt. Doch während schon heute Telekommunikationsnetze und Rechenzentren vom Datenaustausch mit Licht profitieren, ist der «Laser im Chip» noch Zukunftsmusik. PSI-Forschende arbeiten seit Jahren auf diesem Gebiet und haben auch die nötigen Untersuchungsmethoden entwickelt. Nun konnten sie zeigen, dass eine



In einem Laserlabor des PSI untersucht der Doktorand Richard Geiger ein Material, aus dem zukünftig Laser für Computerchips hergestellt werden könnten.

Verbindung von Germanium und Zinn, die Wissenschaftler des Forschungszentrums Jülich entwickelt haben, tatsächlich Laserlicht erzeugen kann. Zudem lässt sich diese Verbindung gut mit Silizium verbinden, wichtig für die Herstellung des Mini-Lasers in einer Silizium-Chip-Fabrik. Für den Einbau in einen Chip ist das Material aber noch ungeeignet – denn es muss durch einen zweiten Laser dazu angeregt werden, Licht abzustrahlen. Auch funktioniert es bis jetzt nur bei tiefen Temperaturen. Das gemeinsame Ziel der Forschungsgruppen in Jülich und am PSI ist nun, das Material so zu modifizieren, dass es sich bei Raumtemperatur mit elektrischem Strom zum Leuchten bringen lässt.

## Montage frei

Die Sonne war noch nicht aufgegangen, als der Sondertransporter am Morgen des 18. April die Einfahrt zum SwissFEL-Gebäude passierte. Aufgrund seiner empfindlichen Fracht war nur eine Nachtfahrt möglich gewesen. Eine ruhige Fahrt bei möglichst konstanter Geschwindigkeit musste gewährleistet sein. Nachdem sich der Container klimatisiert hatte und geöffnet werden konnte, war es dann soweit: Das vier Meter lange und rund 16 Tonnen schwere Undulator-Gestell konnte ausgeladen werden.

Damit war das erste von insgesamt zwölf Undulator-Gestellen der Firma MDC Max Daetwyler AG von Ursenbach zur Fertigmon-



Das SwissFEL-Undulatorgestell wird aus dem Container gehoben. Insgesamt zwölf Stunden dauert der Transport in das SwissFEL-Gebäude und die Platzierung vor Ort.

tage am PSI im Gebäude für den zukünftigen Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL, die neue Grossforschungsanlage des PSI, angekommen. In den Undulatoren werden später je 1060 fein justierte Magnete Elektronen auf eine Slalombahn zwingen und sie so dazu bringen, das spezielle SwissFEL-Röntgenlicht abzustrahlen. Die Anforderungen an die eigens präparierten Montageräume sind hoch: Die Bodengenauigkeit muss über die Undulatorlänge auf vier Millimeter genau sein; die Temperatur darf nur minimal von 24 Grad Celsius, der späteren Betriebstemperatur, abweichen.

Sechs Monate dauert die an mehreren Undulatoren parallel laufende Fertigmontage. Danach werden die fertigen Undulatoren im Monatstakt zur Installation in den Beschleunigungstunnel gebracht. Die Installationsarbeiten beginnen dort bereits Mitte des Jahres mit dem Einbau der Elektronenquelle. Sie werden insgesamt rund eineinhalb Jahre dauern.

## Neue Membran für flexible Stromspeicher

# Die richtige Haut



Mehr Strom aus Wind und Sonne soll in Zukunft durch die Schweizer Netze fließen. Da aber Solarpaneele und Windräder nicht stetig Strom liefern, entsteht mal eine Stromlücke, mal ein Stromüberschuss, der das Netz überlastet. Diese Schwankungen könnte man mit Energiespeichern auffangen, die man bei Überschuss auffüllt und bei Bedarf wieder anzapft.

Forschende des PSI wollen mit einer neuartigen Technologie einem solchen Speicher zum Durchbruch verhelfen: der sogenannten Redox-Flussbatterie. Wie jede Batterie speichert diese elektrische Strom dadurch, dass Stoffe in ihrem Inneren verändert werden. Durch Umkehren dieser Veränderungen gibt die Batterie bei Bedarf wieder Strom ab.

In der Redox-Flussbatterie ist, wie in herkömmlichen Batterien, ein Elektrolyt enthalten – eine Flüssigkeit, die Strom leitet und so die Funktion der Batterie ermöglicht. Das Besondere dabei: Der Elektrolyt dient hier zudem als der Stoff, in dem die Energie gespeichert wird. Genau genommen sind es zwei Elektrolytlösungen, je eine für den negativen und den positiven Pol der Bat-

Mit dieser Membran, die in seiner Forschungsgruppe entwickelt wurde, hofft Lorenz Gubler, die flexible Speicherung von Strom aus Windrädern und Solaranlagen kostengünstiger zu machen.



terie. Und noch ein wichtiger Unterschied zu konventionellen Batterien: Die Elektrolytlösungen sind in externen Tanks gespeichert und nicht in der Batterie selbst. Das hat Vorteile: Die Energiemenge, die die Batterie speichern kann, ist nicht durch ihre Grösse beschränkt, sondern wächst, wenn man die Tanks vergrössert. Von der Grösse der Batterie selbst hängt nur deren Leistung ab – das heisst, wie schnell sie Energie aufnimmt oder abgibt. Deshalb kann man die Redox-Flussbatterie unterschiedlichen Bedürfnissen anpassen – je nachdem, ob man viel Energie speichern oder schnelle Schwankungen in der Stromproduktion auffangen will.

### Die Membran als Kostentreiber

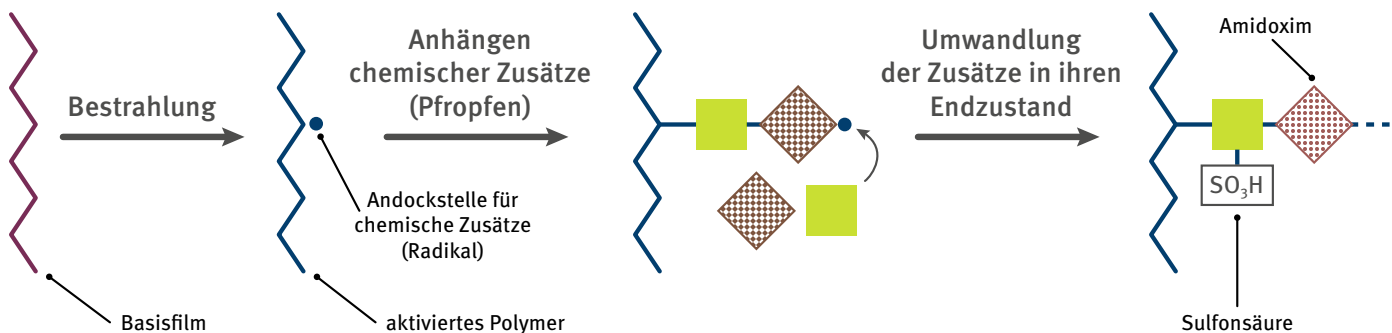
Dem kommerziellen Durchbruch der Redox-Flussbatterie steht vor allem die Membran im Weg, die die beiden Elektrolytlösungen trennt und so eine Selbstentladung der Batterie verhindert. Die Membran besteht

heute aus dem teuren Kunststoff Nafion und macht dadurch 20 bis 40 Prozent der Gesamtkosten aus. PSI-Forschende arbeiten an einer Membran, die wesentlich günstiger als die aus Nafion sein soll und trotzdem mindestens genauso leistungsfähig und robust und dabei über mehrere Jahrzehnte stabil.

Die Membran des PSI besteht aus einem kostengünstigen Kunststoff, dem die Wissenschaftler erst mit einer speziellen Behandlung die nötigen Eigenschaften verleihen. «So wie Gärtner auf einen robusten Stamm fremde, wertvolle Pflanzen pflanzen, erhält hier das Gerüst des Kunststoffs zusätzliche Bestandteile, die wichtige Funktionen übernehmen», erklärt Lorenz Gubler, der die Entwicklung des Verfahrens am PSI geleitet hat. Um die aufgepfropften Bestandteile dauerhaft an das Kunststoffgerüst zu binden, muss man in diesem mit einem Elektronenstrahl bindungsfreudige Stellen, Radikale genannt, schaffen.

### Neuerung durch Patent geschützt

Die PSI-Forschenden haben ihre Membran mit einem Zusatz versehen, der Redox-Flussbatterien wesentlich verbessert, in denen Salze des Metalls Vanadium als Energieträger im Elektrolyten dienen. Der neue Zusatz ist eine Amidoxim-Gruppe, ein Molekül, das Vanadium-Ionen besonders gut bindet. Und das ist das entscheidende Detail: Die bessere Vanadium-Barriere bewirkt einen höheren Wirkungsgrad – das heisst geringere Energieverluste – der Batterie. Ihre Neuerung haben die PSI-Forschenden deshalb kürzlich zum Patent angemeldet. «Die Vanadium-Redox-Flussbatterie ist langlebig, umweltfreundlich und flexibel einsetzbar. Das Kostenproblem könnten wir jetzt mit unserer Technologie lösen», sagt Lukas Bonorand, der das Projekt zur Entwicklung der Membran leitet. «Innerhalb eines Jahres», fügt er hinzu, «möchten wir die Voraussetzungen für die Gründung einer Firma zur Vermarktung unserer Membran erarbeiten.»



Redox-Flussbatterien könnten das Problem der Speicherung überschüssigen erneuerbaren Stroms in Zukunft lösen, aber wegen der nötigen Membran ist diese Technologie noch zu teuer. PSI-Forschende verwenden eine günstige Plastikfolie (Basisfilm) und machen sie fit für den Einsatz in Redox-Flussbatterien. Der Basisfilm erhält durch Bestrahlung mit Elektronen und anschliessendes Anhängen chemischer Zusätze (Pfropfen) die erforderlichen Eigenschaften. So entsteht eine kostengünstige, robuste und leistungsfähige Membran.



## Interview mit Damien Charles Weber

# Protonen gegen Tumore

**Herr Weber, ist die Tumorbehandlung mittels Protonentherapie am Paul Scherrer Institut eine Erfolgsgeschichte?**

Das kann man so sagen. Als hier in Villigen 1984 erstmals Augentumore mit Protonen bestrahlt wurden, verfügte das PSI damit über die erste Anlage europaweit. In den vergangenen 25 Jahren wurden 7000 Patienten hier behandelt. 98 Prozent unserer Augenpatienten gelten als geheilt. An unseren Behandlungsplätzen «Gantry 1» und «Gantry 2» haben wir zudem tausend Patienten mit tief im Körper liegenden Tumoren therapiert. Hier haben wir ebenfalls sehr ermutigende Ergebnisse mit über 80 Prozent Tumorkontrolle.

**Am PSI werden sehr viele krebskranke Kinder behandelt. Was macht die Protonentherapie für diese Patientengruppe so wichtig?**

Kinder sind kleiner als Erwachsene und ihre Organe liegen daher wesentlich näher beieinander. Aus diesem Grund ist es schwierig, das Tumorgewebe zu bestrahlen, ohne dabei gleichzeitig andere Organe zu treffen. Mittels konventioneller Radiotherapie verabreichte Strahlen können weniger genau gesteuert werden und

haben auch eine grössere Streuung als die Bestrahlung mit Protonen, die ihre zerstörende Wirkung sehr präzise an den berechneten Stellen im Krebsgewebe entfaltet und nicht im gesunden Gewebe.

**Sie führen als Chefarzt ein medizinisches Zentrum an einem Forschungsinstitut. Fühlen Sie sich manchmal ein wenig als Exot?**

Ja und nein. Diese Doppelrolle hat Vorteile für uns und für die Patienten. Einer-

seits werden am Zentrum für Protonentherapie sehr erfolgreich Patienten behandelt. Andererseits treiben wir die Forschung immer weiter voran. Hier werden Techniken entwickelt, die erst in fünf bis zehn Jahren implementiert werden. Da profitieren wir von der Interaktion zwischen medizinischer Physik und Strahlentherapie. Sie bringt uns immer wieder spannende Diskussionen, da hier Leute mit völlig unterschiedlichen Hintergründen nach der bestmöglichen Lösung suchen.

### Zur Person

Der Romand Damien Charles Weber ist seit September 2013 Leiter und Chefarzt des Zentrums für Protonentherapie (ZPT) am PSI. Er ist Professor für Radio-Onkologie an den Universitäten Zürich und Bern.

Nach seinem Medizinstudium in Genf und seiner Facharztprüfung in Onkologie/Radio-Onkologie hat Damien Weber am Harvard Laboratory Cyclotron und am North East Proton Therapy Center in den USA im Bereich der Protonentherapie gearbeitet. Nach seiner Rückkehr aus den USA war er am PSI tätig und wiederum in Genf als stellvertretender Chefarzt.

Weber ist auch Präsident der Wissenschaftlichen Gesellschaft der Schweizer Radio-Onkologen. Seine Frau ist Fachärztin für Kinder- und Jugendmedizin. Das Paar hat zwei erwachsene Kinder. In seiner Freizeit geht Weber segeln und Ski fahren.

### Was macht die Aufgabe am Zentrum für Protonentherapie für Sie so reizvoll?

Zu uns kommen jene 5 bis 6 Prozent der Krebspatienten, die radiotherapeutisch behandelt werden und die in kein Schema der normalen Onkologie passen. Wir suchen für jeden einzelnen dieser speziellen Fälle die beste Strategie. Es sind Fälle, die in normalen Krebstherapiezentren kaum vorkommen.

#### Protonentherapie am PSI

Das PSI führt das einzige Zentrum für Protonentherapie der Schweiz. Hier steht ein Behandlungsgerät für Augentumore – OPTIS – zur Verfügung. Ausserdem verfügt das Therapiezentrum über zwei Bestrahlungsgeräte – Gantry 1 und Gantry 2 – zur Bestrahlung tief liegender Tumore. Im Bau befindet sich derzeit eine dritte Gantry, die ab 2016 für den Patientenbetrieb bereitstehen soll. Anders als die sonst in der Radiologie eingesetzten Bestrahlungsverfahren schonen Protonen das umliegende gesunde Gewebe optimal und stoppen das Tumorstadium dennoch erfolgreich. Mit der am PSI entwickelten Spot-Scanning-Technik können tief liegende Krebstumore zielgenau bestrahlt werden. Das Verfahren ist nur für bestimmte Tumorerkrankungen geeignet, eine Liste findet man unter: [www.psi.ch/protontherapy/indikationen](http://www.psi.ch/protontherapy/indikationen).

### Wie kamen Sie selbst ans PSI?

In den Jahren 2003/04 arbeitete ich bereits hier am PSI, am Zentrum für Protonentherapie. So kannte ich das Aufgabengebiet und das Umfeld. Als sich 2013 die Möglichkeit bot, die Leitung des Zentrums zu übernehmen, konnte ich dieser Herausforderung nicht widerstehen.

### Was sind Ihre Ziele in den nächsten Jahren?

Es ist in der Protonentherapie wie überall – alles altert. Unsere Geräte und die Software sind alle in den 1990er-Jahren am PSI entwickelt worden. Sie waren zum Zeitpunkt ihrer Entstehung wegweisend und gehören bis heute zum Besten, was es in diesem Bereich gibt. Man kann aber nicht darüber hinwegsehen, dass es immer aufwendiger wird, sie zu warten und funktionstüchtig zu halten. Wir müssen modernisieren und zum Teil auf Technologien umstellen, die auf dem Markt erhältlich sind. Das gilt etwa für Systeme, mit denen wir die Behandlung planen.

### Ist der Behandlungsplatz «Gantry 3» ein solcher Fall, bei dem Sie auf dem Markt einkaufen statt selber zu entwickeln?

Müssten wir die «Gantry 3» selber bauen, würde dies viel zu lange dauern. Da der Kanton Zürich 20 Millionen Franken aus dem Lotteriefonds für dieses Projekt zur Verfügung stellt, will er auch zügig mit der Behandlung von Patienten beginnen. Daher entsteht dieser Behandlungsplatz erstmals in Zusammenarbeit mit einem kommerziellen Entwickler solcher Geräte.

### Wohin wird der Weg in der Behandlung mit Protonen in den nächsten Jahren gehen?

Wir wollen künftig auch Tumore behandeln können, die durch ihre Lage im Oberbauch oder in der Lunge beim Atmen unweigerlich bewegt werden. Dazu muss der Protonenstrahl in der Lage sein, diesen Bewegungen präzise zu folgen. Wir könnten in einem Jahr so weit sein.

### Und was ist die nächste Stufe, in die die Entwicklung der Protonentherapie führen wird?

Wir entwickeln eine noch schonendere Scanning-Technologie, die wir als «repainting strategy» bezeichnen. Dabei «streichen» wir mit unzähligen kleinsten Strahlmengen wieder und wieder über den Tumor.

### Das sind ehrgeizige Pläne. Sie sind nicht nur am PSI tätig, sondern haben auch noch Professuren an den Universitäten Bern und Zürich. Wie bringen Sie das alles zeitlich unter einen Hut?

Am Berner Inselspital habe ich ein klinisches Projekt in einem 10-Prozent-Pensum. In Zürich arbeite ich ebenfalls 10 Prozent. Man muss extrem gut organisiert sein und exzellente Mitarbeiter haben. Ich hatte auch das Glück, eine sehr gute Assistentin zu finden, die mir den Rücken frei hält. Ich versuche mit meinen Mitarbeitern einen guten Kontakt auf nicht konventionellen Wegen zu pflegen, denn ich bin ja nicht 100 Prozent vor Ort. Wenn es die Zeit erlaubt, gehen wir zusammen essen oder Kaffee trinken, um die soften Informationen auszutauschen. Das ist wichtig, wenn es laufen soll.



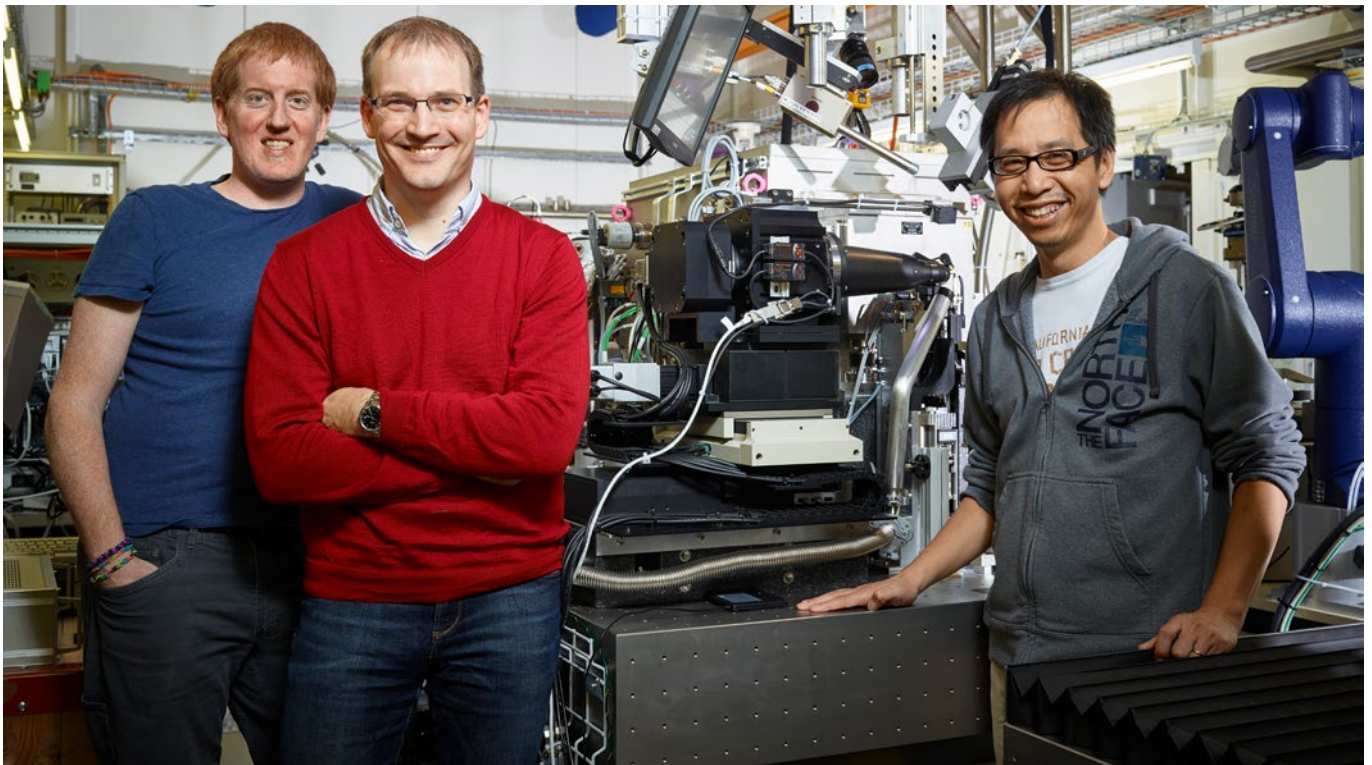
## An SwissFEL und SLS Biomoleküle entschlüsseln

# Gemeinsam statt einsam

Ohne Proteine läuft in unserem Körper gar nichts. Als vielfältige Wandlungskünstler sitzen sie in jeder Zelle und steuern unsere Körperfunktionen. Ein Beispiel von vielen sind sogenannte Chemokin-Rezeptoren in

unserem Immunsystem. Sie sorgen dafür, dass unsere Abwehrzellen dorthin wandern, wo sie ungeliebte Eindringlinge wie Viren oder Bakterien am effektivsten bekämpfen können.

Insbesondere für die Medikamentenentwicklung sind Proteine aufgrund ihrer Schlüssel-Funktionen ein begehrtes Forschungsobjekt. Doch bleibt ihre Erforschung mühsam.



Christopher Milne, Jörg Standfuss und Meitian Wang an der SLS-Strahllinie, an der künftig Experimente mit serieller Kristallografie stattfinden sollen.



Eine der Schlüsselmethoden biologischer Forschung ist Biomoleküle zu kristallisieren, mittels Röntgenlicht zu durchleuchten und aus dem dabei abgelenkten Licht auf die Struktur der Moleküle zurückzurechnen. Auch an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS des PSI werden mit dieser Methode seit vielen Jahren tiefe Einblicke in die Struktur von Biomolekülen gewonnen.

Erst durch die Kristallisation werden die Moleküle abbildbar. Doch so leicht wie die Kristalle des Meersalzes, die von alleine überbleiben, wenn das Meerwasser verdunstet ist, machen es die fragilen und bedeutend komplexeren Proteine den Forschenden nicht: «Bei manchen Proteinen dauert eine effiziente Kristallisation mehrere Jahre, bei anderen wie den Chemokin-Rezeptoren können wir die für die Experimente erforderliche Grösse der Kristalle nicht erreichen», sagt Jörg Standfuss, der am PSI auf die Erforschung dieser widerstandsfähigen Zeitgenossen spezialisiert ist.

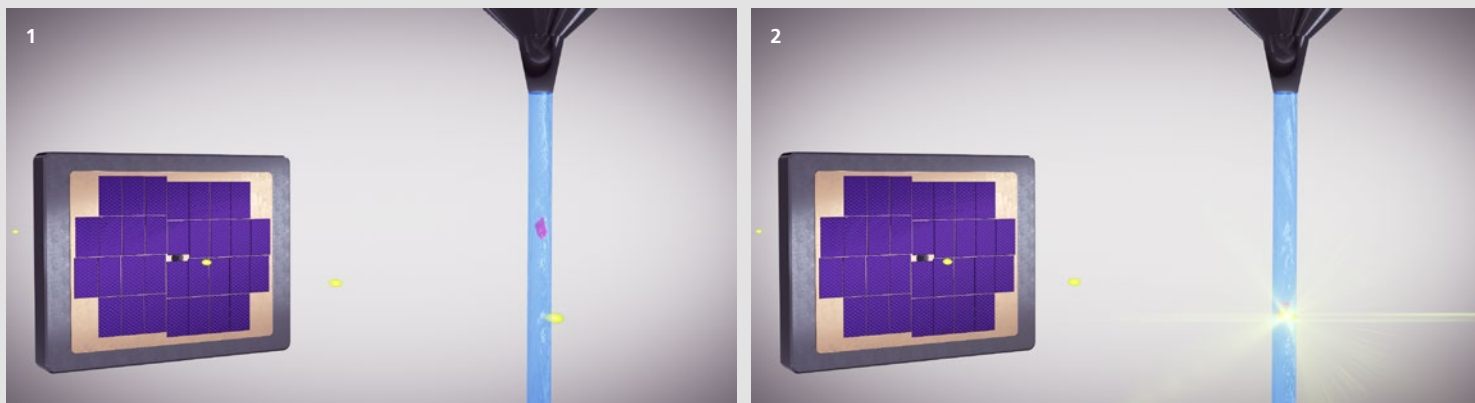
### Stückweise zur Molekül-Struktur

Der zurzeit vielversprechendste Ausweg aus dieser Misere heisst serielle Kristallografie. Statt wie bisher einzelne grosse Kristalle zu rotieren, um sie so von möglichst vielen verschiedenen Seiten zu durchleuchten und abzubilden, injiziert man Tausende kleine, identische Kristalle hintereinander (daher die Bezeichnung «seriell») in den Röntgenstrahl. Die beim Zusammentreffen zwischen Strahl und den einzelnen Kristallen abgelenkten Lichtstrahlen werden aufgezeichnet und diese Aufzeichnungen zusammengefügt. Mit einer ausreichend grossen Anzahl von Kristallen ergibt sich ein genaues Strukturbild des Proteins.

Entwickelt wurde diese Methode für den Einsatz an Freie-Elektronen-Röntgenlasern wie dem SwissFEL, der gerade am PSI gebaut wird. Die grosse Strahlungsintensität der Röntgenlaser zerstört jeden Kristall innerhalb kürzester Zeit, sodass ein Rota-

tionsexperiment nicht möglich wäre. Dem Messergebnis tut dies keinen Abbruch, im Gegenteil: Der Strahlbeschuss ist so kurz gepulst, dass die abgelenkten Lichtstrahlen der noch völlig unbeschädigten Kristalle erfasst werden können. Zudem funktioniert die Methode bei Raumtemperatur, das heisst die Moleküle müssen nicht – wie sonst üblich – auf unter minus 173 Grad Celsius abgekühlt werden.

«Mit der seriellen Kristallografie werden wir Proteine in ihrer natürlichen Form untersuchen können», freut sich Standfuss. Noch einen Schritt weiter hofft der Biologe Proteine, die je nach Funktion ihre Form gezielt verändern, endlich einmal in Aktion zu erleben: «Das können wir erreichen, indem wir bei einer Reihe von identischen Kristallen gleichzeitig eine Reaktion anregen und die Kristalle zeitversetzt in den Röntgenstrahl injizieren.» Die Forscher erhalten so jeweils eine Abbildung der Struktur zu einem bestimmten Zeitpunkt der



Bei der seriellen Kristallografie werden Kristalle in einen Röntgenstrahl injiziert (Bild 1). Beim Zusammentreffen zwischen Strahl und Kristall (Bild 2) werden Lichtstrahlen abgelenkt (Bild 3). Die abgelenkten Lichtstrahlen werden von einem Detektor aufgezeichnet (Bild 4). Aus den Lichtmustern, die viele gleiche Kristalle auf

Reaktion und können diese zu einem Film zusammensetzen.

Am SwissFEL wird die serielle Kristallografie ab Inbetriebnahme zur Verfügung stehen. 100 Röntgenpulse wird der Freie-Elektronen-Röntgenlaser pro Sekunde abfeuern. «Eine der Herausforderungen ist, die Kristalle so zu injizieren, dass sie punktgenau mit den Pulsen zusammentreffen», sagt Christopher Milne, der am SwissFEL jene Experimentierstation entwickelt, die die serielle Kristallografie anbieten wird. Kleinere Kristalle sind zwar in der Regel leichter herzustellen, trotzdem ist bei vielen Proteinen ihre mögliche Anzahl begrenzt. Kein Kristall sollte ins Leere injiziert werden und für das Experiment verlorengehen.

### Die Synergie im Blick

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit läuft auf Hochtouren und sie beschränkt sich nicht nur auf den SwissFEL. «Die Methoden, welche für die Probeninjektion

an Freie-Elektronen-Röntgenlasern entwickelt wurden, dürften auch die Möglichkeiten erweitern, Proteine an Synchrotron-Lichtquellen zu untersuchen», betont Standfuss. «Das ist wichtig, weil selbst mit dem SwissFEL die Zahl der Experimentierplätze an Freie-Elektronen-Röntgen-Lasern stark limitiert sein wird, so dass man sich da auf Experimente beschränken wird, die an anderen Anlagen absolut nicht möglich sind.»

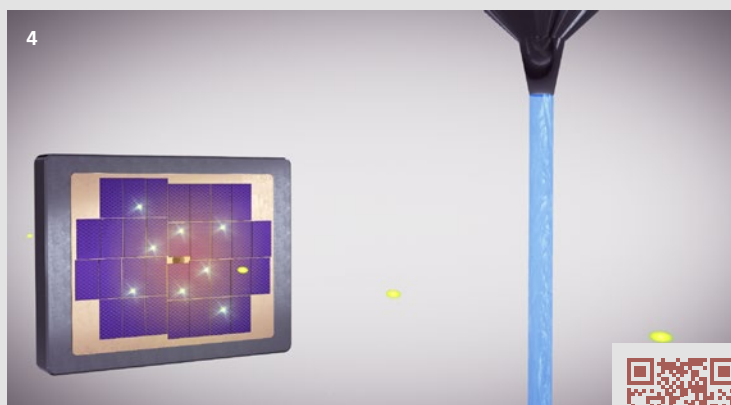
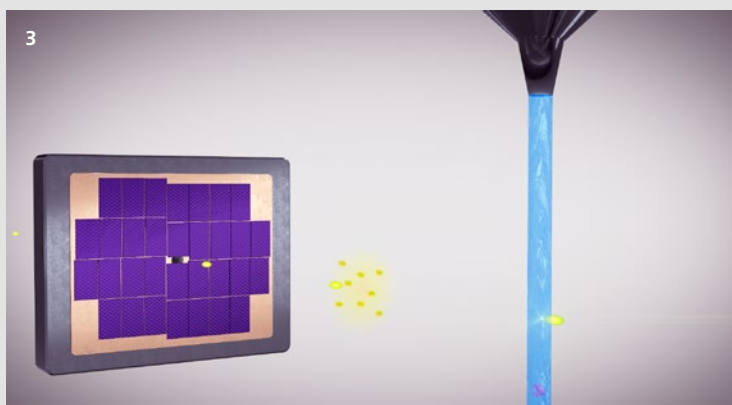
«Erste Studien zeigen das grosse Potenzial serieller Kristallografie an Synchrotron-Lichtquellen», so Meitian Wang, der an der SLS für jene Strahllinie verantwortlich ist, an der künftig derartige Experimente stattfinden sollen. Nun geht es am PSI darum, die Methode an konkreten Beispielen weiterzuentwickeln. Eines davon ist einer der eingangs erwähnten Chemokin-Rezeptoren – ein Protein mit dem technisch anspruchsvollen Namen CCR7. Es spielt eine wichtige Rolle bei der Bekämpfung von

Entzündungsprozessen im Körper. Und es ist eines jener Proteine, die bisher nicht effizient kristallisiert werden konnten.

Das Feld ist im Umbruch und es entwickelt sich rasend schnell. Milne ist aber davon überzeugt, dass ein wenig Ruhe einkehren wird, wenn der SwissFEL einmal in Betrieb ist: «Der durchschnittliche Biologe will messen und sich nicht dauernd mit einer neuen Methode herumschlagen. Er will einfach nur das bestmögliche Resultat und wir werden dafür sorgen, dass er es bekommt.»

Originalveröffentlichungen:  
**Lipidic cubic phase serial millisecond crystallography using synchrotron radiation.**  
 P. Nogly et al.  
*IUCr* **2**, 168–176 (2015).

**Room-temperature serial crystallography at synchrotron X-ray sources using slowly flowing free-standing high-viscosity microstreams.**  
 S. Botha et al.  
*Acta Cryst. D* **71**, 387–397 (2015)



dem Detektor erzeugen, lässt sich der Aufbau der Kristalle bestimmen. Die vier hier gezeigten Bilder stammen aus einer Animation, die man über den QR-Code oder den Link <https://youtu.be/8gLmH-I8jUM> aufrufen kann. (Grafik: Mahir Dzambegovic / PSI)



## Portrait Sven Reiche

# Endlich einmal dabei sein

Erst möchte er nicht damit herausrücken. Aber dann erzählt Sven Reiche doch von den Zufällen: Die Beschleunigeranlagen, an denen Reiche mitgearbeitet hatte, gingen immer genau dann in Betrieb, wenn er selbst gerade nicht vor Ort war.

Natürlich hat das nichts zu bedeuten. Aber als Wissenschaftler für grosse Teilchenbeschleuniger wäre er einfach gerne einmal dabei, wenn es losgeht. Wenn an einer «seiner» Anlagen der Schalter umgelegt und der erste Teilchen- oder Laserstrahl registriert wird.

Seit 2008 ist Reiche am PSI. Ein grosser, freundlicher Mann. Mit grossen Händen und einem freundlichen, runden Gesicht, das beim Sprechen ständig zu lachen scheint. Reiche ist Gruppenleiter und Teilprojektleiter am SwissFEL, dem Schweizer Freie-Elektronen-Röntgenlaser, der neuesten Grossanlage, die derzeit am PSI gebaut wird.

### Erster Akt

Und dann beginnt Reiche zu erzählen: Akt eins spielt 1996 während seiner Doktorarbeit. Der gebürtige Hamburger hatte in seiner Heimatstadt studiert und promoviert.

Das Hamburger Forschungszentrum DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron), war sogar der Grund gewesen, weshalb er Physik als Studienfach wählte: «Als ich klein war, gab's einen Tag der offenen Tür am

DESY. Der Kontrollraum dort sah aus wie im Raumschiff Enterprise. Da wusste ich: Das will ich später mal machen.»

Vorausblende zu seiner Promotion. Er macht einen neunmonatigen Gastaufenthalt in Los Angeles und arbeitet dort an einem Infrarot-Freie-Elektronenlaser mit. Doch das Erfolgserlebnis verpasst Reiche: Erst nach seiner Rückkehr nach Hamburg bringen die Amerikaner den Laser zum Laufen.

Und das ist erst der Anfang. Auf den letzten Konferenzen haben seine in- und ausländischen Kollegen wiederholt über Reiches «Pechsträhne» gewitzelt. Wenn er das erzählt, scheint bei dem grossen Mann ein bisschen der trotzig Junge durch.



Der Physiker Sven Reiche, Teilprojektleiter beim SwissFEL-Projekt, hat weltweit an verschiedenen Beschleunigeranlagen gearbeitet.

Es ist klar, dass ihn seine Kollegen mögen und respektieren und ihn nur darum so aufziehen.

### Zweiter Akt

Reiche ist zurück in Hamburg, um seine Promotion am Freie-Elektronen-Laser FLASH zu beenden. Weil die Hamburger Forschenden jederzeit erwarten, dass die Anlage anläuft, schreibt Reiche zuletzt im Kontrollraum des FLASH an seiner Dissertation – er will den entscheidenden Moment nicht verpassen. Doch dieser kommt nicht. Erst zwei Monate nachdem Reiche seine Promotion beendet hat, startet diese Grossanlage.

Zu diesem Zeitpunkt ist Reiche schon wieder in den USA. Er hat direkt im Anschluss an seine Doktorarbeit eine Postdoc-Stelle bekommen, wieder in Los Angeles. Und verpasst so ein zweites Mal den erfolgreichen Start einer Anlage, an der er mitgearbeitet hat.

Insgesamt acht Jahre bleibt Reiche dieses Mal in den USA und arbeitet mit den Wissenschaftlern der Röntgenlaser-Grossanlage LCLS zusammen. Dann verschlechtern sich nach und nach die Bedingungen für ihn: Forschungsbudgets werden gekürzt, Reiche bekommt keine Unterstützung für eine Green Card und keine Professoren-Stelle an der Uni. Er beschliesst, zurück nach Europa zu gehen.

Reiche fragt Jörg Rossbach, seinen ehemaligen Doktorvater aus Hamburg, wo es eine zukünftige Aufgabe für ihn geben könne. Der Doktorvater vermittelt ihm den Kontakt ans PSI. Wenige Monate später kann Reiche dort seine neue Stelle antreten. Das war vor bald sieben Jahren.



Sven Reiche und seine Gruppe im Kontrollraum, von dem aus die Beschleunigeranlagen des PSI gesteuert werden – bis vor kurzem auch die SwissFEL-Testanlage und in Zukunft der SwissFEL selbst.

### Dritter Akt

Die dritte Episode ist erst ein Jahr her, spielt also an den Testanlagen zum SwissFEL. Reiche und seine Kollegen hatten einen Undulator eingebaut: eine Magnetanordnung, die die beschleunigten Elektronen dazu anregt, Laserlicht auszusenden. Dies ist das Grundprinzip des SwissFEL. Die Testanlage wird also gestartet, aber es scheint, als geschehe nichts. Reiche hat einen Termin in den USA. «Und genau in der Woche, in der ich weg bin, sehen meine Kollegen den Laserspot», erzählt Reiche zerknirscht. Kaum ist er zurück, ist der nächste Wurm drin und er bekommt das Erfolgserlebnis erst einmal nicht zu sehen. «Das war wirklich die Krönung.»

Obwohl das alles Zufälle sind, treiben sie Reiche doch um. Oder nein: Sie treiben ihn an. 2016 soll der SwissFEL in Betrieb gehen. Und Reiche wird dabei sein, da ist er sich sicher. Die Pechsträhne wird dann ein Ende finden.

Reiche muss weiter: Einer seiner Doktoranden feiert gleich seinen Abschied vom PSI. Der junge Mitarbeiter wird eine Stelle in den USA antreten, in Los Angeles. Den Kontakt hat ihm Reiche vermittelt; ganz selbstverständlich gibt er weiter, was einst sein Doktorvater für ihn getan hat. Mit einem Lachen und einem grossen Händedruck verabschiedet sich der Wissenschaftler.



## Messungen mit Neutronen

# Wettlauf um fantastische Wirbel

Skyrmionen – als Erstes muss man sich diesen Namen auf der Zunge zergehen lassen. Er klingt nach einer Fabeltier-Spezies aus Alice im Wunderland. Vielleicht ist ein Skyrmion ein irisierender Fisch, der stets im Schwarm unterwegs ist?

Wenn also Jonathan White, Physiker am PSI, erzählt, dass er Skyrmionen untersucht, möchte man erst einmal nachfragen, ob er von Alices seltsamen Pilz genascht hat.

White erklärt dann, dass Skyrmionen durchaus real sind. Das Problem: Das macht es nicht leichter, sie sich vorzustellen. Ein Skyrmion ist ein kleiner Wirbel in den Spins eines Materials. Der Spin wiederum ist ein Quantenphänomen, das Atome dazu bringt, sich wie kleine Stabmagnete zu verhalten und so für die magnetischen Eigenschaften von Materialien verantwortlich ist. Um Spins abzubilden, zeichnen Physiker Pfeile. Diese Pfeile sind dabei so im Raum ausgerichtet wie die gedachten Stabmagnete.

### Wie Wirbel im Igelfell

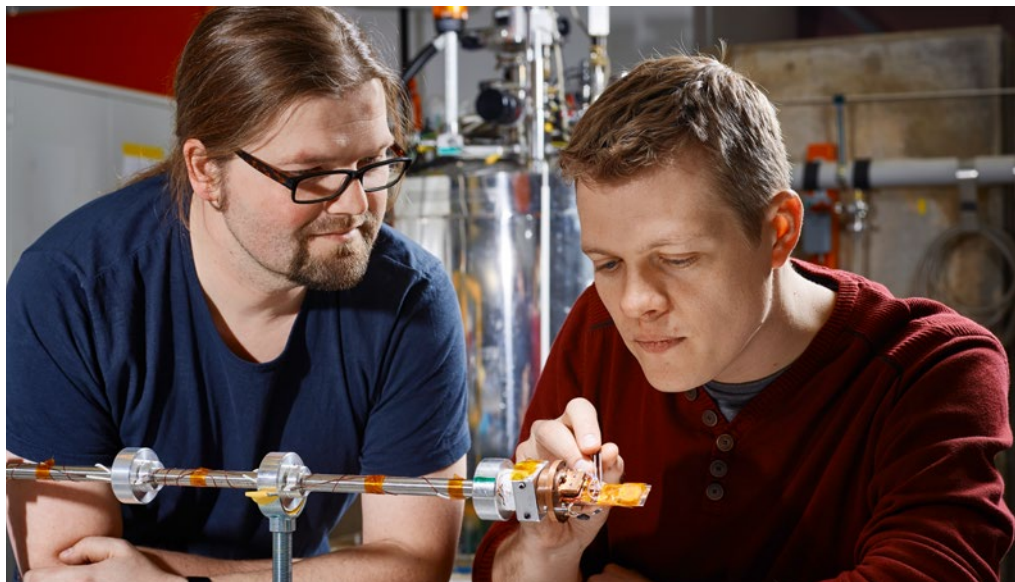
Ein Skyrmion ist also ein örtlich begrenzter Strudel in den ganzen gedachten Spin-Pfeilen eines Materials. So dargestellt sieht ein Skyrmion in etwa so aus,

als hätte ein Igel einen Wirbel in seinem Stachelfell.

Warum White sich mit diesen seltsamen Wirbeln abgibt? «Skyrmionen könnten eines Tages zur Datenspeicherung dienen», erklärt der Physiker. Ein Computer könnte sie als digitale Einsen oder Nullen interpretieren. Da Skyrmionen sehr klein sind, ließen sich digitale Daten mit diesen Spin-

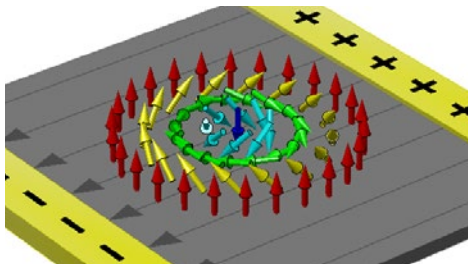
wirbeln sehr dicht packen. Doch bis dahin ist es noch ein weiter Weg, der nur möglich wird, wenn Skyrmionen gut verstanden sind und sich zuverlässig steuern lassen. Und genau dafür braucht es Whites Forschung.

Die Skyrmionen, die White untersucht, haben doch etwas gemeinsam mit unseren Fischen: Sie treten tatsächlich im Schwarm auf. Sogar in einem sehr geordneten



Die PSI-Forschenden Marek Bartkowiak und Jonathan White montieren eine Probe, die in einem Neutronen-Experiment untersucht werden soll. Der Probenhalter kann ein elektrisches Feld erzeugen, so dass man beim Experiment beobachten kann, wie sich die Probe verhält, wenn sie einem solchen Feld ausgesetzt wird.





Skyrmionen könnten helfen, in zukünftigen Computern die Daten dichter zu speichern. Ein Skyrmion entsteht, wenn sich Spins, die man sich sehr vereinfacht als winzige Stabmagnete denken kann, in einem Material in der typischen Wirbelform anordnen.

Schwarm – Whites Skyrmionen stehen in Reih und Glied. Denn dann lassen sie sich mit Neutronenstrahlen untersuchen.

Die Neutronen, die White nutzt, kommen aus der PSI-Spallations-Neutronenquelle SINQ. Ein 20 Meter langes Rohr führt von dort auf Whites Experiment zu. Darin wird der Neutronenstrahl korrigiert und geformt, bis er für die Untersuchung von Skyrmionen ideal ist. Die Neutronen gelangen dann in die Experimentierkammer. Darin befindet sich ein kristallines Material, das von Skyrmionen durchzogen ist.

### Magnetismus elektrisch steuern

Im Fall von Whites Experiment ist dieses Material kein ganz alltägliches: Es handelt sich um eine kristalline Probe aus Kupferselenid. Das Material hat die Besonderheit, dass es erstens ein elektrischer Isolator und zweitens magnetoelektrisch ist. Es leitet also keinen Strom. Und setzt man es einem elektrischen Feld aus, so lassen sich darüber seine magnetischen Eigenschaften steuern.

Magnetoelektrische Materialien sind Whites Spezialgebiet. Ursprünglich hatte

seine Forschung nicht viel mit Skyrmionen zu tun. Doch dann erschien im Jahr 2012 eine wissenschaftliche Publikation japanischer Forscher, die Skyrmionen in Kupferselenid nachgewiesen hatten. «Da wusste ich, was wir zu tun hatten», sagt White: Er nahm sich vor, Skyrmionen in diesem besonderen Material nicht nur herzustellen, sondern auch kontrolliert zu beeinflussen, also in Bewegung zu versetzen. Diese Bewegung würde er mit Neutronenstrahlen verfolgen und vermessen.

Allerdings war White nicht der einzige, der diese Idee hatte. «Es gab ein regelrechtes Wettrennen zwischen mehreren Forschergruppen», erzählt White.

Skyrmionen tauchen nicht von selbst in einem Material auf. Die Materialprobe muss hierfür stark gekühlt und zugleich einem schwachen Magnetfeld ausgesetzt werden.

Um einmal entstandene Skyrmionen zu beeinflussen, lässt man üblicherweise einen elektrischen Strom durch das Material fließen. Eine offene Frage in der Forschungsgemeinde war jedoch bislang, ob sich auch in elektrischen Isolatoren Skyrmionen steuern lassen. Das Isolator-Material Kupferselenid war für diese Untersuchung der ideale Kandidat: White konnte die magnetoelektrische Kopplung des Stoffs ausnutzen und so auf den elektrischen Strom verzichten.

### Geballte Kompetenz

So kühlten White und seine Kollegen ihre Experimentierkammer auf rund minus 217 Grad Celsius ab und legten ein schwaches Magnetfeld an, um die Skyrmionen zu erzeugen. Ausserdem bauten sie die Möglichkeit ein, gezielt ein elektrisches Feld an

die Probe anzulegen, um den Skyrmionen-Schwarm in eine kollektive Bewegung zu versetzen. All diese Komponenten – Neutronen, Kühlung, magnetisches und elektrisches Feld – mussten perfekt aufeinander abgestimmt sein. «Aber da hat das PSI einen grossen Vorteil», erklärt White: «Für all diese Bereiche arbeiten hier Experten, die ich jeweils um Hilfe bitten konnte.»

Und so konnten White und seine Kollegen tatsächlich die Skyrmionen sichtbar machen. Dann schalteten sie das elektrische Feld ein und konnten zudem beobachten, wie die Skyrmionen zu wandern begannen.

Die geballte Kompetenz am PSI zahlte sich aus: «Nur zwei Monate, nachdem die japanische Studie über Skyrmionen in Kupferselenid veröffentlicht worden war, hatten wir unser Experiment schon aufgebaut», so White. Innerhalb von sechs Monaten hatten sie alle nötigen Daten gesammelt, dann schrieben White und seine Kollegen ihre eigene Veröffentlichung in der renommierten Zeitschrift *Physical Review Letters* und kamen damit der internationalen Konkurrenz zuvor.

Übrigens haben Skyrmionen ihren Namen ganz profan nach einem Physiker namens Tony Skyrme erhalten. Er hatte die wirbeligen Quasiteilchen in den 1960er-Jahren theoretisch beschrieben. Bei Alice im Wunderland war er unseres Wissens nie.

Originalveröffentlichung:  
**Electric-Field-Induced Skyrmion Distortion and Giant Lattice Rotation in the Magnetoelectric Insulator  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$**   
 J. S. White, et al.  
*Phys. Rev. Lett.* **113**, 107203 (2014)





# Die Grossforschungsanlagen des PSI

Der Blick auf die ganz kleinen Objekte benötigt besonders grosse Geräte, denn nur sie können die «Sonden» erzeugen, die notwendig sind, um Materie so zu durchleuchten, dass man die gesuchten Informationen gewinnt. Das Paul Scherrer Institut hat von der Schweizerischen Eidgenossenschaft den Auftrag erhalten, mehrere solche Anlagen zu unterhalten. Diese stellt das PSI den Wissenschaftlern von Hochschulen und anderen wissenschaftlichen Einrichtungen sowie der Industrie im Rahmen eines Nutzerdienstes als Dienstleistung zur Verfügung. Das PSI nutzt sie aber auch für eigene Forschung. Die Anlagen sind in der Schweiz einzigartig, manche Geräte gibt es auch weltweit nur am PSI.

## Forschen mit grossen Geräten

An den Grossanlagen des PSI werden Neutronen, Myonen und Synchrotronlicht erzeugt. Neutronen und Myonen sind kleine Teilchen, Synchrotronlicht ist Röntgenlicht mit höchster Intensität und einstellbarer Energie. Mit diesen drei «Sonden» kann man Informationen über den Aufbau verschiedenster Materialien gewinnen, wobei jede für bestimmte Experimente besonders gut geeignet ist. Die Benutzer finden am PSI

rund 40 verschiedene Messplätze für ihre Experimente vor.

## Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS

Synchrotronlicht ist eine besonders intensive Form von Licht, das in seinen Eigenschaften genau an die Bedürfnisse eines Experiments angepasst werden kann. Mit Synchrotronlicht «durchleuchten» Forschende unterschiedlichste Materialien, um deren detaillierten Aufbau oder die magnetischen Eigenschaften zu bestimmen. Untersucht werden beispielsweise magnetische Materialien, wie sie in modernen Speichermedien verwendet werden, und Proteinmoleküle, die eine wesentliche Rolle bei Vorgängen in lebenden Organismen spielen. Das Synchrotronlicht entsteht an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Es wird hier von Elektronen abgestrahlt, die fast mit Lichtgeschwindigkeit auf einer Kreisbahn von 288 m Umfang laufen, in der sie durch starke Magnete gehalten werden.

## Spallations-Neutronenquelle SINQ

Mit Neutronen kann man die Anordnung und Bewegung von Atomen in Materialien

bestimmen. Da Neutronen sich wie kleinste Magnete verhalten, eignen sie sich besonders gut zur Untersuchung magnetischer Eigenschaften. In der Natur kommen sie als Bausteine des Atomkerns vor. Am PSI werden sie in der Spallationsquelle SINQ (sprich: sin-ku) aus den Atomkernen herausgeschlagen und so für Experimente verfügbar gemacht.

## Myonenquelle $\mu\text{S}$

Myonen werden vor allem dafür eingesetzt, Magnetfelder im Inneren von Materialien zu bestimmen. Myonen sind Elementarteilchen, die in ihren Eigenschaften den Elektronen ähneln. Sie sind aber deutlich schwerer und vor allem instabil. Zerfällt ein Myon im Inneren eines magnetischen Materials, liefert es Informationen über das Magnetfeld in den Materialien. Myonen werden am PSI in der Myonenquelle  $\mu\text{S}$  (sprich: es-mü-es) erzeugt.

## Protonenbeschleunigeranlage

Die Neutronen aus der SINQ, die Myonen aus der  $\mu\text{S}$  sowie die Myonen- und Pionenstrahlen für Teilchenphysikexperimente entstehen, wenn ein Strahl schneller Pro-

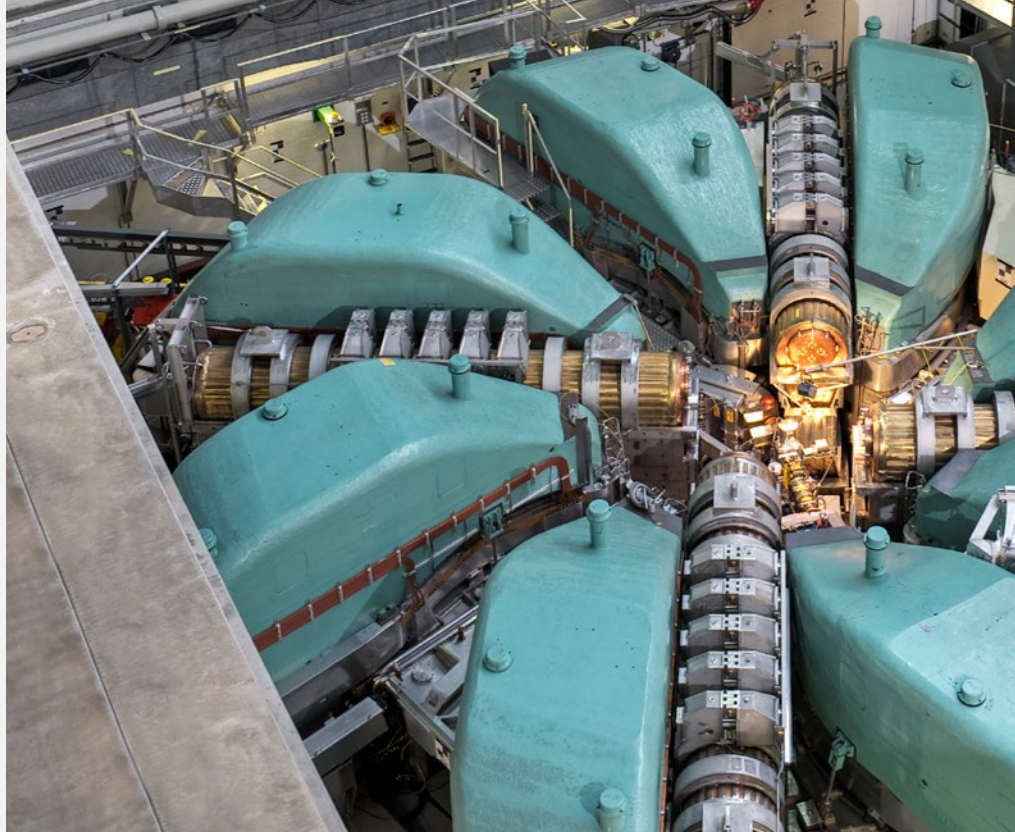
tonen auf einen Block eines speziellen Materials trifft. Der Protonenstrahl wird in der Protonenbeschleunigeranlage des PSI erzeugt. Hier werden die Protonen auf fast 80 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

### Hotlabor, Smogkammer etc.

Neben den eigentlichen Grossanlagen betreibt das PSI eine Reihe von weiteren einzigartigen Forschungsanlagen, die teilweise auch externen Benutzern zur Verfügung stehen. Im Hotlabor können hoch radioaktive Objekte wie Brennstäbe aus Kernkraftwerken unter sicheren Bedingungen untersucht werden. In der Smogkammer werden unter kontrollierten Bedingungen Vorgänge in der Atmosphäre simuliert. Der Solarkonzentrator und Solarsimulator erlauben Experimente zur Erzeugung von Brennstoffen mithilfe von hoch konzentriertem Sonnenlicht. Eine Quelle ultrakalter Neutronen UCN ermöglicht Untersuchungen zu den Eigenschaften des Neutrons.

### SwissFEL – die neue Grossanlage

Zurzeit entsteht am PSI eine weitere Grossanlage, die im Jahr 2016 in Betrieb gehen wird – der Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL. Diese knapp 740 Meter lange Anlage wird extrem kurze Pulse von Röntgenlicht in Laserqualität erzeugen. Damit wird es unter anderem möglich werden, sehr schnelle chemische und physikalische Vorgänge zu verfolgen.



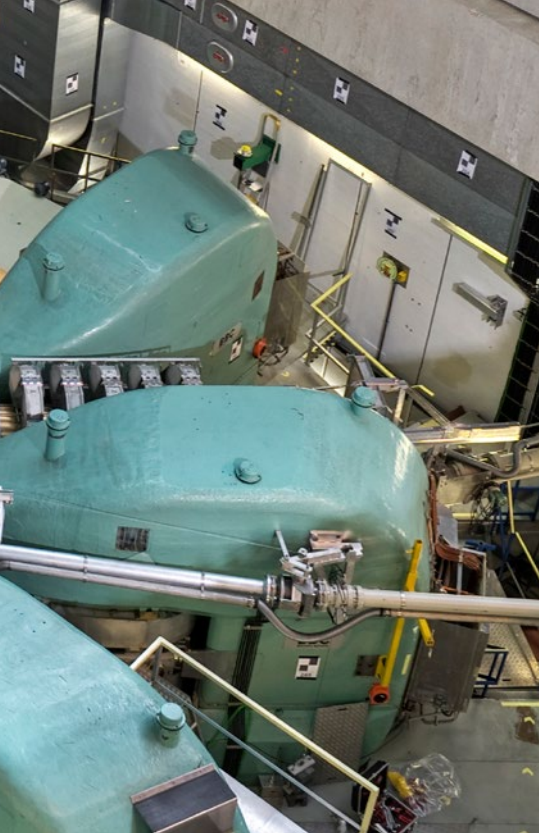
Blick auf den grossen Protonenbeschleuniger, der einen Umfang von rund 48 Metern hat.

## Das PSI ist ein Nutzerlabor

Neutronen, Synchrotronlicht und Myonen sind für Forschende vieler Disziplinen äusserst nützlich. Mit diesen «Sonden» lässt sich der Aufbau von Kristallen entschlüsseln. Sie helfen beim Verständnis magnetischer Vorgänge oder klären Strukturen biologischer Materialien auf. Gleichzeitig ist die Erzeugung dieser Sonden mit einem so grossen Aufwand verbunden, dass die meisten Forschergruppen an den Hochschulen und in der Industrie an der eige-

nen Einrichtung keine Neutronen-, Myonen- oder Synchrotronlichtquelle vorfinden werden.

Damit dennoch möglichst viele Forschende Zugang zu Neutronen, Synchrotronlicht oder Myonen erhalten, betreibt das PSI zentral die entsprechenden Grossanlagen: die Neutronenquelle SINQ, die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS und die Myonenquelle  $\mu S$  – eine Kombination von Anlagen, die es weltweit nur noch an einem



## Die Messzeit geht an die besten Forschungsprojekte

Sämtliche Forscherinnen und Forscher, die sich durch die Nutzung von Neutronen, Myonen oder Synchrotronlicht Antworten auf ihre wissenschaftlichen Fragestellungen erhoffen, können sich beim PSI um Messzeit bewerben. Dazu müssen sie in einem Antrag die Fragestellung, das geplante Experiment und die Erwartungen an die Messung beschreiben. Mit Fachleuten besetzte Komitees prüfen diese Messzeitanträge auf ihre wissenschaftliche Qualität und empfehlen dem PSI, welche Anträge tatsächlich Messzeit bekommen sollen. Denn obwohl es rund 40 Messplätze gibt, reicht die Zeit nie für alle eingegangenen Bewerbungen. Rund ein Drittel bis die Hälfte der Anträge muss abgelehnt werden. Manche Messplätze sind in der Forschergemeinde sogar so begehrt, dass dort viermal so viel Messzeit beantragt wird, wie verfügbar ist. Angezogen werden die externen Forscher und Forscherinnen dabei nicht nur von den Experimentiermöglichkeiten, sondern auch von der guten Betreuung durch die PSI-Forschenden. Diese sind selbst erfahrene Wissenschaftler und unterstützen die Nutzer dabei, an den Anlagen die optimalen Ergebnisse zu erzielen.

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 in einem beson-

deren Verfahren auch Strahlzeit kaufen und die Anlagen des PSI für ihre angewandte Forschung verwenden.

## Nutzerdienst in Zahlen

Der Erfolg eines Benutzerzentrums zeigt sich vor allem im Interesse der Forschergemeinde, an diesem Ort zu experimentieren, sowie in der Zahl von Veröffentlichungen, die auf den durchgeführten Experimenten beruhen.

So erschienen 2014 mehr als 800 Fachartikel, die auf Experimenten an den Grossanlagen des PSI basieren. Und jährlich verzeichnet das PSI mehr als 5000 Besuche von Wissenschaftlern aus der ganzen Welt, die an den Grossanlagen ihre Experimente durchführen. Die meisten Nutzer von Neutronen und Synchrotronlicht kommen aus der Schweiz und den Ländern der EU. Die Schweizer Experimentatoren teilen sich wiederum etwa gleichmässig auf das PSI und andere Einrichtungen auf, wobei die meisten externen Forscher von der ETH Zürich kommen. Vertreten sind aber auch die ETH Lausanne, die Hochschulen und die Empa. Im Fall der Myonenexperimente ist der Anteil der Gruppen aus Übersee besonders gross. Eine Rolle spielt hier sicher die Tatsache, dass das PSI als einziges Institut weltweit Experimente mit langsamen Myonen anbietet.

weiteren Ort gibt. Das Institut stellt diese Anlagen nicht nur den eigenen Wissenschaftlern, sondern auch externen Benutzern zur Verfügung – Forschenden aus der Schweiz und dem Ausland, die diese Sonden für ihre Untersuchungen benötigen.

An den Grossanlagen sind auch noch Teilchenstrahlen verfügbar, die für Experimente in der Elementarteilchenphysik genutzt werden können – auch diese stehen externen Forschern offen.



# Die Forschungsschwerpunkte des PSI

Das Paul Scherrer Institut PSI ist das grösste naturwissenschaftliche Forschungszentrum der Schweiz. Mehr als 700 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erforschen verschiedenste Fragestellungen, die sich unter den drei Stichworten «Materie und Material», «Mensch und Gesundheit» sowie «Energie und Umwelt» zusammenfassen lassen.

Die am PSI gewonnenen Forschungsergebnisse tragen dazu bei, dass wir die Welt um uns besser verstehen können, indem sie die Hintergründe unterschiedlichster physikalischer oder biologischer Vorgänge aufklären. Gleichzeitig stellen sie die Grundlagen für neue Entwicklungen in Technik und Medizin dar.

## Materie und Material

Die meisten Forschenden, die sich am PSI mit Materie oder Material befassen, wollen für unterschiedliche Stoffe den Zusammenhang zwischen dem innerem Aufbau und den beobachtbaren Eigenschaften aufklären. Denn die vielfältigen Eigenschaften der Materialien, aus denen die Welt besteht, werden dadurch bestimmt, aus welchen Atomen die Materialien bestehen, wie diese angeordnet sind und wie sie sich bewegen können.

So geht es zum Beispiel darum zu verstehen, warum manche Materialien supraleitend sind – elektrischen Strom also ganz ohne Widerstand leiten können – oder wie die magnetischen Eigenschaften von Materialien zustande kommen. Diese Erkenntnisse können für verschiedene technische Entwicklungen genutzt werden, um bessere elektronische Bauteile zu entwickeln.

Die Forschenden des Labors für Teilchenphysik interessieren sich für die fundamentale Frage nach den Grundstrukturen der Materie. Dazu untersuchen sie Aufbau und Eigenschaften der Elementarteilchen – der kleinsten Bausteine der Materie. Damit betreiben sie Forschung, die den Bogen vom Urknall zur heute vorgefundenen Materie mit ihren Eigenschaften spannt.

## Mensch und Gesundheit

Wesentliche Vorgänge in lebenden Organismen auf molekularer Ebene zu verstehen und neue Methoden zur Diagnose und Behandlung von Krankheiten zu entwickeln, sind die Ziele der Forschung auf dem Gebiet «Mensch und Gesundheit».

Im Mittelpunkt der Forschung zu biologischen Grundlagenfragen steht die Bestimmung von Struktur und Funktion von Proteinen – Biomolekülen, die in vielfältiger

Weise das Verhalten von lebenden Zellen steuern. Auf dem Gebiet der Radiopharmazie entwickeln Forschende des PSI Therapiemoleküle, mit denen sehr kleine und im ganzen Körper verteilte Tumore behandelt werden sollen. Hier arbeitet das PSI sehr eng mit Hochschulen, Kliniken und der Pharmaindustrie zusammen.

Seit 1984 werden an der Protonentherapieanlage des PSI Patienten behandelt, die an bestimmten Tumorerkrankungen leiden. Die Anlage, die PSI-Fachleute entwickelt und auf dem Institutsgelände gebaut haben, ist weltweit einmalig. Ihre Bestrahlungstechnik nutzt die Vorteile der Protonen, die es erlauben, den Tumor gezielt zu zerstören und die gesunde Umgebung des Tumors optimal zu schonen. In Absprache mit der medizinischen Abteilung des PSI können Ärztinnen und Ärzte Patienten und Patientinnen zur Behandlung ans PSI überweisen.

## Energie und Umwelt

Die Energieforschung des Paul Scherrer Instituts konzentriert sich auf die Erforschung von Prozessen, die in nachhaltigen und sicheren Technologien für eine möglichst CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung eingesetzt werden können.

PSI-Forschende arbeiten an Verfahren zur CO<sub>2</sub>-neutralen Erzeugung von Energieträgern – sei es mithilfe hoch konzentrierter 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 und als «Abfallprodukte» Wasser und Wärme erzeugen.

Ein wichtiges Thema der Energieforschung am PSI sind Arbeiten zur sicheren

Nutzung der Kernenergie. Ein Schwerpunkt der Forschung ist dabei, die Vorgänge in Kernkraftwerken noch besser zu verstehen, um so zu deren sicherem Betrieb beizutragen. Hinzu kommen geologische Untersuchungen, die Grundlage für die Suche nach geeigneten Standorten für die Lagerung radioaktiven Abfalls sein sollen.

Über Untersuchungen zu einzelnen Energietechnologien hinaus, widmen sich Forschende des PSI auch der ganzheitlichen Betrachtung und dem Vergleich von nuklearen, fossilen und erneuerbaren Energiesystemen.

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 Atmosphärenzusammensetzung sowie die Entwicklung des Klimas in den vergangenen Jahrhunderten ist für die Forscher von Interesse.

Darüber hinaus leitet das PSI zwei Kompetenzzentren zur Energieforschung im Rahmen des Aktionsplans «Koordinierte Energieforschung Schweiz» zu den Themenfeldern «Biomasse» und «Speicherung».



Weitere Informationen zu den beiden Kompetenzzentren.  
<http://psi.ch/ao78>

In der Halle der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS.



# Das PSI im Überblick

| Finanzzahlen 2014                                                          | Mio. CHF     | %            |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|
| <b>Finanzierungsbeitrag des Bundes</b>                                     |              |              |
| Globalkredit                                                               | 300,4        | 100,0        |
| Wovon Investitionen in Bauten ETH-Bereich                                  |              |              |
| Eigentum Bund*                                                             | -20,6        | -6,9         |
| <b>Total für Forschung, Lehre &amp; Betrieb der Grossforschungsanlagen</b> | <b>279,8</b> | <b>93,1</b>  |
| <b>Einnahmen</b>                                                           |              |              |
| Total für Forschung, Lehre & Betrieb der Grossforschungsanlagen            | 279,8        | 74,0         |
| Drittmiteleinnahmen                                                        |              |              |
| – Privatwirtschaft                                                         | 40,2         | 10,6         |
| – Forschungsförderung Bund                                                 | 28,0         | 7,4          |
| – EU-Programme                                                             | 10,9         | 2,9          |
| – Andere Einnahmen                                                         | 23,8         | 6,3          |
| Bestandsveränderung zweckgebundenes Kapital                                | -4,5         | -1,2         |
| <b>Total Einnahmen</b>                                                     | <b>378,2</b> | <b>100,0</b> |
| <b>Ausgaben</b>                                                            |              |              |
| Personalausgaben*                                                          | 234,6        | 62,0         |
| Sachausgaben*                                                              | 79,7         | 21,1         |
| Investitionen*                                                             | 63,9         | 16,9         |
| <b>Total Ausgaben</b>                                                      | <b>378,2</b> | <b>100,0</b> |

\*inklusive Ausgaben SwissFEL

Die Ausgaben verteilen sich auf die Forschungsfelder des Paul Scherrer Instituts wie folgt:

|                                                |      |
|------------------------------------------------|------|
| Festkörperforschung und Materialwissenschaften | 35 % |
| Allgemeine Energie                             | 20 % |
| Lebenswissenschaften                           | 24 % |
| Nukleare Energie und Sicherheit                | 13 % |
| Teilchenphysik                                 | 8 %  |

**Personal**  
PSI hatte Ende 2014 rund 1900 Mitarbeitende. Davon war ein Viertel Postdocs, Doktorierende und Lernende. Insgesamt sind 39 Prozent der Stellen mit wissenschaftlichem Personal besetzt. 50,5 Prozent der Mitarbeitenden führen technische oder Ingenieurstätigkeiten aus. Mit ihrer vielfältigen Kompetenz sorgen sie dafür, dass die vorhandenen wissenschaftlichen Anlagen des Instituts stets zuverlässig funktionieren und neue plangemäss aufgebaut werden. Damit haben sie wesentlichen Anteil an den wissenschaftlichen Leistungen des Instituts. 7,9 Prozent der Stellen sind der Administration zugeordnet. 25 Prozent der Mitarbeitenden sind Frauen, 48 Prozent sind ausländische Staatsbürger.

**Organisation**  
Das Paul Scherrer Institut ist in 7 Bereiche gegliedert. Die 5 Forschungsbereiche sind für den grössten Teil der wissenschaftlichen Arbeiten und die Betreuung der externen

Nutzer zuständig. Sie werden von den beiden Fachbereichen unterstützt, die für den Betrieb der Beschleunigeranlagen und verschiedene technische und administrative Dienste zuständig sind. Ausserhalb der Bereichsstruktur befinden sich das Zentrum für Protonentherapie und das Grossprojekt SwissFEL. Geleitet wird das PSI von einem Direktorium, an dessen Spitze der Direktor des Instituts steht und dem die Bereichsleiter angehören.

**Beratende Organe**  
Eine interne Forschungskommission berät die PSI-Direktion bei wissenschaftsrelevanten Entscheidungen. Sie beurteilt geplante Vorhaben und Finanzierungsanträge an externe Geldgeber wie z.B. den Schweizerischen Nationalfonds SNF, die Förderagentur für Innovation KTI oder die EU. Sie evaluiert laufende Projekte und arbeitet bei der Identifizierung von geeigneten neuen Forschungsthemen für das PSI mit. Sie setzt sich aus 13 Mitarbeitenden der verschiedenen Bereiche des PSI zusammen. Ein- bis zweimal im Jahr tagt der PSI-Beratungsausschuss, dem 12 Forschende mit hohem wissenschaftlichem Ansehen aus dem In- und Ausland angehören. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, die Direktion in Fragen der Entwicklung grösserer Forschungsprogramme und -vorhaben strategisch zu beraten und die Qualität der durchgeführten und geplanten Forschungsaktivitäten zu beurteilen.

# Impressum

Fenster zur Forschung  
Ausgabe 2/2015  
Paul Scherrer Institut, Mai 2015  
ISSN 1664-8854

Herausgeber: Paul Scherrer Institut

Die Publikation «Fenster zur Forschung»  
erscheint dreimal jährlich.

Konzeption:  
Alexandra von Ascheraden,  
Dagmar Baroke, Dr. Paul Piwnicki

Redaktion:  
Alexandra von Ascheraden,  
Dagmar Baroke, Martina Gröschl,  
Dr. Laura Hennemann, Leonid Leiva,  
Dr. Paul Piwnicki (Ltg.)

Gestaltung und Layout: PSI

Bildbearbeitung:  
Mahir Dzambegovic, Markus Fischer

Originalveröffentlichung zum Beitrag  
auf Seite 6 rechts:  
**Synthesis of Single Crystal Nanoreactor Materials with Multiple Catalytic Functions by Incipient Wetness Impregnation and Ion Exchange**  
D. Fodor, T. Ishikawa, F. Krumeich, and  
J. A. van Bokhoven, *Adv. Mater.* **27**:  
1919–1923 (2015)

Originalveröffentlichung zum Beitrag  
auf Seite 7 links:  
**Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si**  
S. Wirths, R. Geiger, N. von den Driesch,  
G. Mussler, T. Stoica, S. Mantl,  
Z. Ikonc, M. Luysberg, S. Chiusi,  
J. M. Hartmann, H. Sigg, J. Faist, D. Buca  
& D. Grützmacher,  
*Nature Photonics* **9**, 88–92 (2015)

Legenden für ganzseitige Bilder:

Seite 3: Für eine effiziente  
Protonenbehandlung kommt es darauf  
an, dass der Patient aus verschiedenen  
Richtungen mit Protonen bestrahlt wird.  
Schwere Antriebsketten sorgen dafür,  
dass die rund 250 Tonnen schwere  
Gantry 2 des PSI, die den Protonenstrahl  
zum Patienten leitet, millimetergenau  
bewegt werden kann.

Seite 10: Der Radio-Onkologe Damien  
Charles Weber leitet das Zentrum für  
Protonentherapie am Paul Scherrer  
Institut.

Seite 20: Luftaufnahme des Paul Scherrer  
Instituts.

Fotoaufnahmen:  
Alle Fotos Scanderbeg Sauer  
Photography ausser:  
Seite 7, 20, 22: Markus Fischer

Weitere Exemplare zu beziehen bei:  
Paul Scherrer Institut  
Events und Marketing  
5232 Villigen PSI, Schweiz  
Telefon +41 56 310 21 11  
info@psi.ch

psi forum – Das Besucherzentrum  
des Paul Scherrer Instituts  
Sandra Ruchti  
Telefon +41 56 310 21 00  
psiforum@psi.ch, [www.psiforum.ch](http://www.psiforum.ch)

iLab – Das Schülerlabor des  
Paul Scherrer Instituts  
Dr. Beat Henrich  
Telefon +41 56 310 53 57  
ilab@psi.ch, [www.ilab-psi.ch](http://www.ilab-psi.ch)

Mehr über das PSI lesen Sie auf  
[www.psi.ch](http://www.psi.ch)

Unser wichtigstes Kapital am PSI ist die herausragende Qualifikation, Erfahrung und Motivation unserer Mitarbeitenden. Um diesem, in der Sprache der Wirtschaftswissenschaftler «Humankapital» ein Gesicht zu geben, stellen wir Ihnen in dieser Publikation einige Menschen vor, die bei uns arbeiten. Dabei gilt es zu beachten, dass moderne Forschung heute nur noch im Team erfolgreich sein kann. Auch die hier vorgestellten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter haben ihren Erfolg mithilfe eines Teams erzielt.



Das Paul Scherrer Institut PSI ist ein Forschungszentrum für Natur- und Ingenieurwissenschaften. Am PSI betreiben wir Spitzenforschung in den Bereichen Materie und Material, Energie und Umwelt sowie Mensch und Gesundheit. Durch Grundlagen- und angewandte Forschung arbeiten wir an nachhaltigen Lösungen für zentrale Fragen aus Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft. Das PSI entwickelt, baut und betreibt komplexe Grossforschungsanlagen. Jährlich kommen mehr als 2200 Gastwissenschaftler aus der Schweiz, aber auch aus der ganzen Welt zu uns. Genauso wie die Forscherinnen und Forscher des PSI führen sie an unseren einzigartigen Anlagen Experimente durch, die so woanders nicht möglich sind. Die Ausbildung von jungen Menschen ist ein zentrales Anliegen des PSI. Deshalb sind etwa ein Viertel unserer Mitarbeitenden Postdoktorierende, Doktorierende oder Lernende. Insgesamt beschäftigt das PSI 1900 Mitarbeitende. Damit sind wir das grösste Forschungsinstitut der Schweiz.

