



PAUL SCHERRER INSTITUT



Fenster zur Forschung

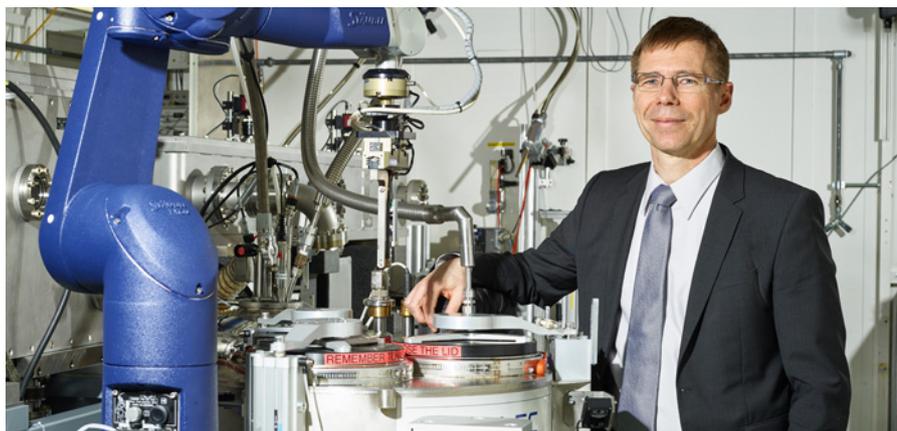
Zebra



Inhalt

5	Industrie 4.0 – Alltag an den Forschungsanlagen des PSI
6 / 7	In Kürze: Betonkrebs EU-Förderung Matterhorn PSI-Spin-off
8 / 9	Ausgeklügelte Messkammer
10 / 11	Die richtigen Fragen zur richtigen Zeit
12 – 14	Ein neues Instrument für das PSI
15 – 17	Den Tumor aushungern
18 / 19	Zoom in den Knochen
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

Industrie 4.0 – Alltag an den Forschungsanlagen des PSI



Sehr geehrte Leserin Sehr geehrter Leser

Ein neues Schlagwort macht gerade die Runde: Industrie 4.0 oder die vierte industrielle Revolution. Es ist ein Sammelbegriff für den nächsten Schritt der Automatisierung im Arbeitsleben. Nun sollen nicht nur repetitive Fließbandtätigkeiten von Maschinen übernommen werden, sondern auch komplexere Aufgaben in der Fertigung oder bei der Steuerung von Anlagen.

In der Forschungstätigkeit des PSI hat die vierte Revolution schon vor Jahren begonnen. So reichen heute zwei Mitarbeitende im zentralen Kontrollraum des PSI aus, um sämtliche Grossforschungsanlagen zu bedienen, die die diversen Experimentier-

bereiche mit den nötigen Teilchenstrahlen versorgen, sowie den Protonenbeschleuniger für die Krebstherapie. Daran wird sich auch nach der Inbetriebnahme einer weiteren Grossforschungsanlage, des SwissFEL, im kommenden Jahr nichts ändern.

Der Entscheid, die Anlagen zu vernetzen und ihren Betrieb zu automatisieren, war wichtig, weil dadurch Stellen frei wurden, die nun für Forschungs- und Entwicklungsprojekte eingesetzt werden können. Diese Art der Vorgehensweise ist einer der Gründe für den Erfolg des PSI in den letzten Jahren und zeigt, dass eine strukturelle Veränderung auch eine Chance für ein Forschungszentrum sein kann.

In Zukunft wird der Automatisierungsprozess auf noch viel mehr Bereiche aus-

gedehnt werden. Beispielsweise geht der Trend dahin, ganze Experimente vollständig zu automatisieren, sodass Roboter die Proben im Versuchsaufbau positionieren und nach dem Experiment wieder versorgen. Auf diese Weise können sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf die Analyse ihrer Messdaten konzentrieren. Für Routinemessungen könnte sogar diese in Zukunft zumindest teilweise von Computern übernommen werden.

Werden die Forschenden am PSI also zukünftig durch Maschinen ersetzt?

Das glaube ich nicht, denn folgende Dinge, die zu ihrer Aufgabenbeschreibung gehören, kann eine Maschine nicht:

- Die relevanten wissenschaftlichen Fragen auswählen, die beantwortet werden müssen.
- Ansätze entwickeln, wie wissenschaftliche Probleme gelöst werden können.
- Innovative Geräte entwerfen, die es ermöglichen, zukünftige wissenschaftliche Fragen zu beantworten.

In der vorliegenden Ausgabe des «Fenster zur Forschung» berichten die meisten Beiträge über Projekte, bei denen einer dieser Punkte im Mittelpunkt steht. Sie zeigen: Nur durch Innovation – und zwar nur durch Innovation auf höchstem Niveau – können Hightech-Gesellschaften wie die Schweiz auch in Zukunft erfolgreich sein.

Professor Dr. Joël Mesot
Direktor Paul Scherrer Institut

Betonkrebs

Wenn Brücken, Stau Mauern und andere Bauwerke aus Beton nach einigen Jahrzehnten von dunklen Rissen durchzogen sind, dann ist AAR die Ursache: die Alkali-Aggregat-Reaktion. Umgangssprachlich auch Betonkrankheit oder sogar Betonkrebs genannt, handelt es sich um eine chemische Reaktion zwischen im Beton vorhandenen Stoffen und von aussen eindringender Feuchtigkeit, beispielsweise Regenwasser. Im Zuge der AAR entsteht im Innern des Betons sehr langsam ein Material, das mehr Raum einnimmt als der ursprüngliche Beton. Über die Dauer von mehreren Jahrzehnten wird der Beton ganz gemächlich von innen heraus gesprengt, was sich auf der Betonoberfläche als ein feines Netz-



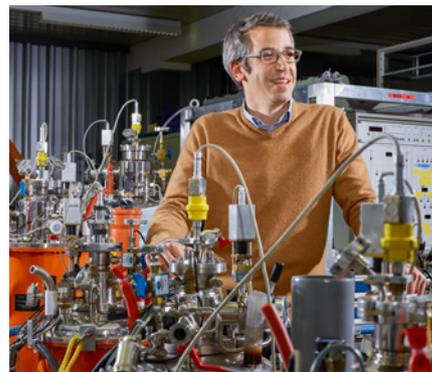
Eine noch nie dokumentierte Silizium-Schichten-Kristallstruktur haben die PSI-Forscher Rainer Dähn und Erich Wieland gemeinsam mit Kollegen der Empa entdeckt, als sie die Materialveränderungen der sogenannten Betonkrankheit analysierten.

werk aus dunklen Rissen zeigt. Auf diese Art schädigt die AAR weltweit Betonbauwerke und macht aufwendige Sanierungen oder Neubauten nötig.

Wie das Material, das im Zuge der AAR entsteht, auf der Ebene einzelner Atome aufgebaut ist, haben jetzt Forschende des PSI und der Empa mithilfe der Röntgenstrahlung an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS des PSI entschlüsselt. Das erstaunliche Ergebnis: Es handelt sich um eine bislang unbekannte kristalline Anordnung der Atome. Das Forschungsergebnis könnte helfen, zukünftig langlebigeren Beton zu entwickeln.

EU-Förderung

Die Welt im Innersten zu verstehen bedeutet nicht nur, ihre Grundbausteine zu kennen; die Wechselwirkungen dieser Bausteine sind ebenso wichtig. Wie magnetische Atome zusammenwirken und so die elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Materie entstehen lassen, das erforscht der Physiker Christian Rüegg, Laborleiter am Paul Scherrer Institut PSI und Professor an der Universität Genf. Rüegg ist Experte auf dem Forschungsgebiet des Quantenmagnetismus. Was für Laien exotisch klingt, ist für die Wissenschaft von fundamentaler Bedeutung. So bedeutend, dass Rüegg nun eine hoch angesehene Förderung erhält: den ERC Consolidator Grant, vergeben durch den Europäischen Forschungsrat der Europäischen Union. Damit erhält Rüegg über eine Dau-



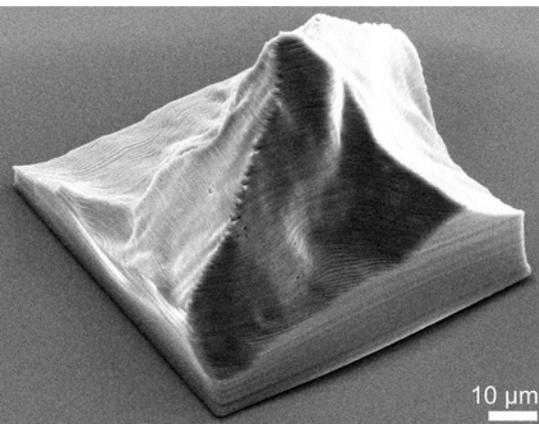
Christian Rüegg – Laborleiter am PSI und zugleich Professor an der Universität Genf – hat für die nächsten fünf Jahre eine hochdotierte Förderung vom Europäischen Forschungsrat zugesprochen bekommen: den ERC Consolidator Grant.

eron fünf Jahren insgesamt rund 2,6 Millionen Schweizer Franken. Die Förderperiode beginnt im Dezember 2016. Das Geld wird Rüegg für neue Forschungsinstrumente und für wissenschaftliche Mitarbeiter einsetzen.

Rüeggs Forschungsgebiet – die Wechselwirkungen zwischen magnetischen Atomen und die daraus hervorgehenden Quanteneffekte in Magneten – ist von grossem theoretischem und praktischem Interesse: «Wir sind an den grundlegenden Eigenschaften von Quantensystemen interessiert», erklärt Rüegg. «Dieses Wissen wird zum Beispiel benötigt, um eines Tages funktionierende Quantencomputer bauen zu können.» Quantencomputer könnten die heutige Computertechnologie ablösen. Sie würden ganz neue Ansätze für Berechnungen, Suchanfragen und Datenspeicherung erlauben und wären in vielerlei Hinsicht deutlich effizienter als bisherige Computer.

Matterhorn

Die Forschungsgruppe Polymer-Nanotechnologie am PSI hat den wohl bekanntesten Berg der Schweiz im Modell auf ein Zehntel-millimeter geschrumpft. Die in Serie hergestellten winzigen 3-D-Modelle sind kleiner, als ein Blatt Papier dick ist. Mit den Modellen der unverwechselbaren Bergsilhouette konnte die Gruppe zeigen, dass sie in der Lage ist, kleinste 3-D-Strukturen in grosser Zahl zu erzeugen. Das ist nicht nur Spielerei. Winzige Oberflächenstrukturen können helfen, Materialien besondere Eigenschaften zu verleihen. Damit kann man etwa Oberflächen von Maschinenbauteilen so verbessern, dass sie weniger stark verschleissen. Dieses Prinzip ist von der Natur her bekannt, wo bei manchen Tieren



3-D-Modell des Matterhorns. Der eingezeichnete Balken entspricht 10 Mikrometern, also einem Hundertstel eines Millimeters.
(Quelle: PSI/Helmut Schiff und Robert Kirchner)

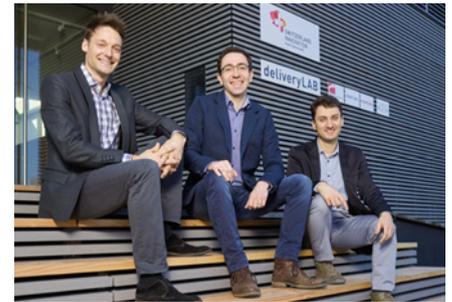
eine Struktur auf der Haut die Reibung in eine Richtung stark vermindert.

Um die Matterhorn-Modelle herzustellen, haben die Forschenden einen besonders detaillierten 3-D-Druck verwendet. Dabei wird lichtempfindliches flüssiges Material belichtet. Dort, wo Licht konzentriert auftrifft, verfestigt sich das Material. Das restliche Material kann später gewaschen werden.

PSI-Wissenschaftler Robert Kirchner erklärt: «Zum Belichten verwenden wir einen Laser, dessen Strahl im Brennpunkt einer Linse intensiv genug ist, das Material entsprechend zu verändern. Diesen Brennpunkt bewegen wir durch das Material hindurch. So können wir für jeden, nur wenige Nanometer grossen Punkt entscheiden, ob das Material am Ende weggewaschen wird oder stehen bleibt.» Das Verfahren ist aufwendig, aber nur für die Urform nötig. Anhand dieser wird eine Gussform erzeugt, die sich für Grossserien eignet.

PSI-Spin-off

Martin Ostermaier hat im Rahmen seiner Doktorarbeit am PSI ausgehend von einer degenerativen Netzhauterkrankung eine Methode entwickelt, mit der sich der Effekt von bestimmten medizinischen Wirkstoffen ermassen lässt. Die Methode hilft in erster Linie, Wirkstoffe viel schneller zu entwickeln. Insgesamt können Risiken und Kosten in klinischen Studien auf diese Weise



Martin Ostermaier (Mitte) und sein Team von InterAx Biotech.

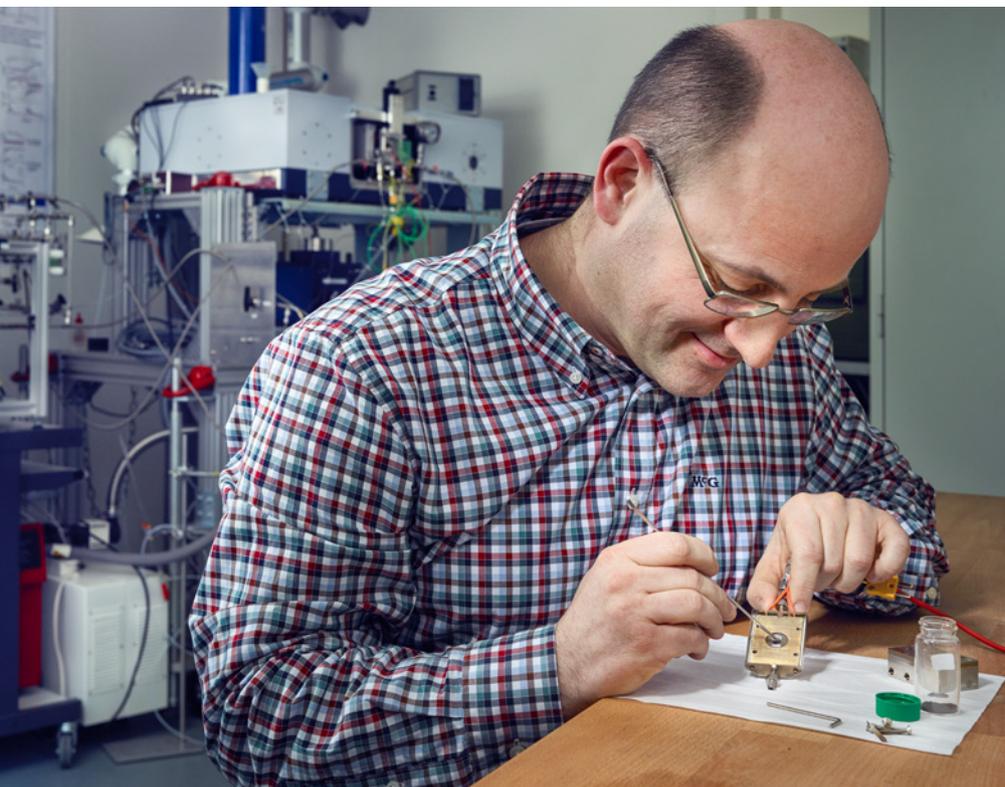
massiv reduziert werden. Diese sehr praxisorientierten Forschungen wurden letztlich mit dem PSI-Impuls-Preis 2015 ausgezeichnet, der anwendungsorientierte Forschungsprojekte prämiert.

Unterstützung während seiner Forschungsarbeit erfuhr Ostermaier durch ein Pioneer Fellowship der ETH Zürich, womit die Entwicklung innovativer Produkte gefördert wird. Inzwischen hat Ostermaier das Unternehmen InterAx Biotech gegründet. Anfang des Jahres erhielt das Jungunternehmen ein Startkapital von 130 000 Franken von der Förderinitiative Venture Kick als Beihilfe für die erste Produktentwicklung.

Das Unternehmen wird sich im Park innovAARE ansiedeln. Es hat bereits einen wichtigen Industriekunden gefunden und arbeitet heute daran, das Verfahren auf vergleichbare biochemische Strukturen auszuweiten. Da die ins Visier genommenen Strukturen für die Wirkung von Medikamenten entscheidend sind, lassen sich die Anwendungsmöglichkeiten der Methode um ein Vielfaches vergrössern.

Leistungsfähigere Katalysatoren für Gasautos

Ausgeklügelte Messkammer



Davide Ferri montiert eine Katalysatorprobe in der Messkammer. Anschliessend wird die Probe in dem im Hintergrund sichtbaren Messinstrument befestigt und dort mit Synchrotronlicht untersucht.

Fahrzeuge mit Gasantrieb sind im Kommen. Der Vorteil liegt auf der Hand: Das als Treibstoff verwendete Erdgas hat unter

allen Treibstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis den niedrigsten CO₂-Ausstoss pro Energieeinheit. Wenn es sich dabei auch noch

um synthetisches Erdgas aus Biomasse handelt, ist der Vorteil sogar noch grösser, da der enthaltene Kohlenstoff aus erneuerbarer Quelle stammt.

Der Markt für Gasautos ist jedoch noch klein, sodass es sich für die Fahrzeughersteller kaum lohnt, eigene, fein abgestimmte Abgaskatalysatoren für Gasmotoren zu entwickeln. Stattdessen passen sie lieber die Katalysatoren an, die bereits für Benzinmotoren auf dem Markt sind. Das Problem dabei: Die Abgase aus Gasmotoren enthalten kleine Mengen Methan, das möglichst nicht in die Atmosphäre gelangen sollte, da es stark zum Treibhauseffekt beiträgt.

Während die Empa daran arbeitet, Gasmotoren und die dazu passenden Katalysatoren technisch zu optimieren, spezialisiert sich das PSI auf ausgeklügelte Untersuchungsmethoden, mit denen man die Vorgänge im Katalysator sehr genau beobachten kann. Mit den Ergebnissen lassen sich verbesserte Katalysatorzusammensetzungen sowie Ideen für einen effizienteren Betrieb entwickeln.

Wirksame Beschichtung

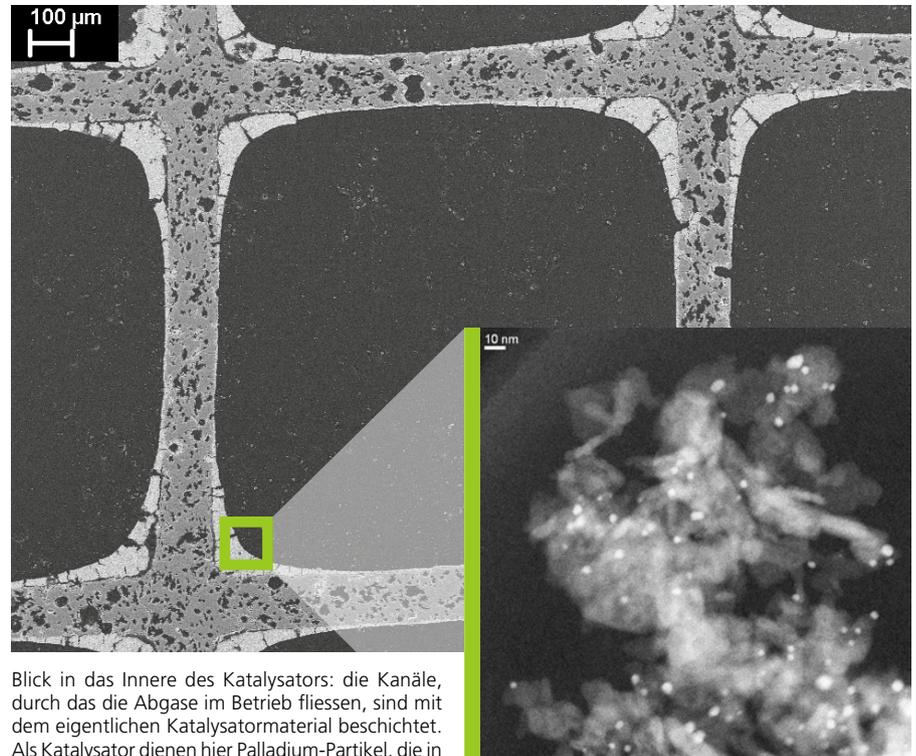
Im Fahrzeugkatalysator wird das Abgas durch eine Vielzahl paralleler Kanäle aus

Keramik geleitet. Deren Oberfläche ist mit Pulver, dem eigentlichen Katalysator, beschichtet. Meist besteht er aus Edelmetallpartikeln, häufig Palladium. Die Schadstoffe im Abgas reagieren mit der Beschichtung und werden dabei in Wasser, Stickstoff und CO_2 umgewandelt. Allerdings lassen sich die Methan-Moleküle mit diesen üblichen Katalysatoren nicht so einfach zersetzen, da andere Abgasbestandteile einfacher an den Katalysator binden als Methan und so die nötige Katalysator-Oberfläche besetzen.

Davide Ferri, Senior Scientist in der Forschungsgruppe Katalyse für Energieprozesse des Paul Scherrer Instituts, erläutert: «Um das auszugleichen, bringt die Industrie bei Katalysatoren für Gasmotoren das Palladium einfach etwas dicker auf und baut darauf, dass das genügt, um alles zu zersetzen. Unser Ziel aber ist es, die Beschichtung zu optimieren, um die Effizienz zu erhöhen und teures Material einzusparen.»

Dazu muss die Forschungsgruppe das Verhalten der Edelmetallpartikel studieren und sehen, wie sie mit den Schadstoffen reagieren. Zudem versucht sie zu verfolgen, ob die Partikel mit der Zeit und unter verschiedenen Bedingungen zusammenwachsen, sodass die Wirksamkeit des Katalysators nachlässt.

Ferri will wissen, was solche Alterungsprozesse auslöst, wie sie ablaufen und wie sie sich hinauszögern lassen. «Wir können solche Prozesse im Detail nachverfolgen, da wir durch die geschickte Kombination mehrerer Messmethoden verfolgen können, wie die Atome oder Moleküle von Palladium und Schadstoffen miteinander reagieren.



Blick in das Innere des Katalysators: die Kanäle, durch das die Abgase im Betrieb fliessen, sind mit dem eigentlichen Katalysatormaterial beschichtet. Als Katalysator dienen hier Palladium-Partikel, die in dem vergrösserten Ausschnitt als kleine helle Punkte erkennbar sind. An diesen Partikeln werden Schadstoffe aus dem Abgas in CO_2 , Wasser und Stickstoff zerlegt. Der eingezeichnete weisse Balken im grossen Bild entspricht 100 Mikrometern, also dem Zehntel eines Millimeters, der Balken im kleinen Bild ist zehntausend Mal kürzer. (Quelle: PSI / Davide Ferri)

Unsere Spezialität ist es, den Katalysator tatsächlich im Labor unter realistischen Bedingungen wie Schwankungen der Temperatur und des Sauerstoffgehalts zu vermessen», berichtet er. Die Forscher benutzen für jede Messmethode exakt angepasste Strahlung, die jeweils nur bestimmte Materialien durchdringen kann.

Normalerweise braucht es für jede Messung eine andere spezialisierte Messkammer, in der die Bedingungen simuliert werden können. Dort muss der Katalysator jeweils zeitaufwendig montiert werden.

Am PSI hat man eine bessere Lösung entwickelt: «Wir haben jetzt eine Messkammer, bei der man lediglich das Fenster passend zur Art der Strahlung auswechseln muss.» So erfolgen mehrere Messungen nicht nur zeitsparend, sondern auch unter absolut identischen Bedingungen in ein und derselben Kammer.

Jetzt können die Forschenden noch effizienter nach besseren Katalysatoren fahnden. Sie werden sich erst zufriedengeben, wenn es einen Katalysator gibt, der auch das letzte Methan-Molekül umwandelt.

Portrait Peter Ming

Die richtigen Fragen zur richtigen Zeit

Dieser Mann hat einen Blick für das Ganze. Gelassen sitzt er in seinem Stuhl, die Hände lässig hinter seinem Kopf verschränkt. Seine leuchtend blauen Augen scheinen zugleich zu fragen und zu wissen. Ein Wissen, das aus der Erfahrung kommt? Seit 30 Jahren ist Peter Ming am Paul Scherrer Institut PSI. Genauso lange begleitet der Verfahrensingenieur Projekte des PSI von ihrem ersten Gedanken bis zum Abschluss. «Das kann bei einem grossen Projekt schon leicht einmal zehn Jahre dauern», gibt Ming ein Gefühl für die Zeitdimension, mit der man es hier zu tun hat. Peter Ming ist am PSI für ein Thema verantwortlich, das immer wesentlich ist, jedoch nur ins Licht der Öffentlichkeit kommt, wenn etwas schiefläuft: Qualitätsmanagement. Die Zeitdimension eines Projekts spielt in seiner Arbeit eine wesentliche Rolle, geht sie doch nicht selten Hand in Hand mit der Komplexität der in der Planung und Umsetzung involvierten Prozesse. Prozesse, die definiert, dokumentiert und laufend optimiert werden müssen – das Kerngeschäft des Qualitätsmanagements.

Mit klaren Schritten ins Unbekannte

Peter Ming hat am PSI Projekte kommen und gehen sehen. Über mangelnde Kom-

plexität konnte er sich bisher nicht beklagen. Zurzeit kümmert er sich um den Freielektronen-Röntgenlaser SwissFEL, dessen Installation am PSI in die Zielgerade geht. Eine solche Grossanlage entsteht in tausenden Einzelschritten. Bevor man mit dem SwissFEL Forschungsneuland betreten kann, musste erst das Gebäude gebaut werden. Stück für Stück wird nun die fast 740 Meter lange Anlage zusammengesetzt.

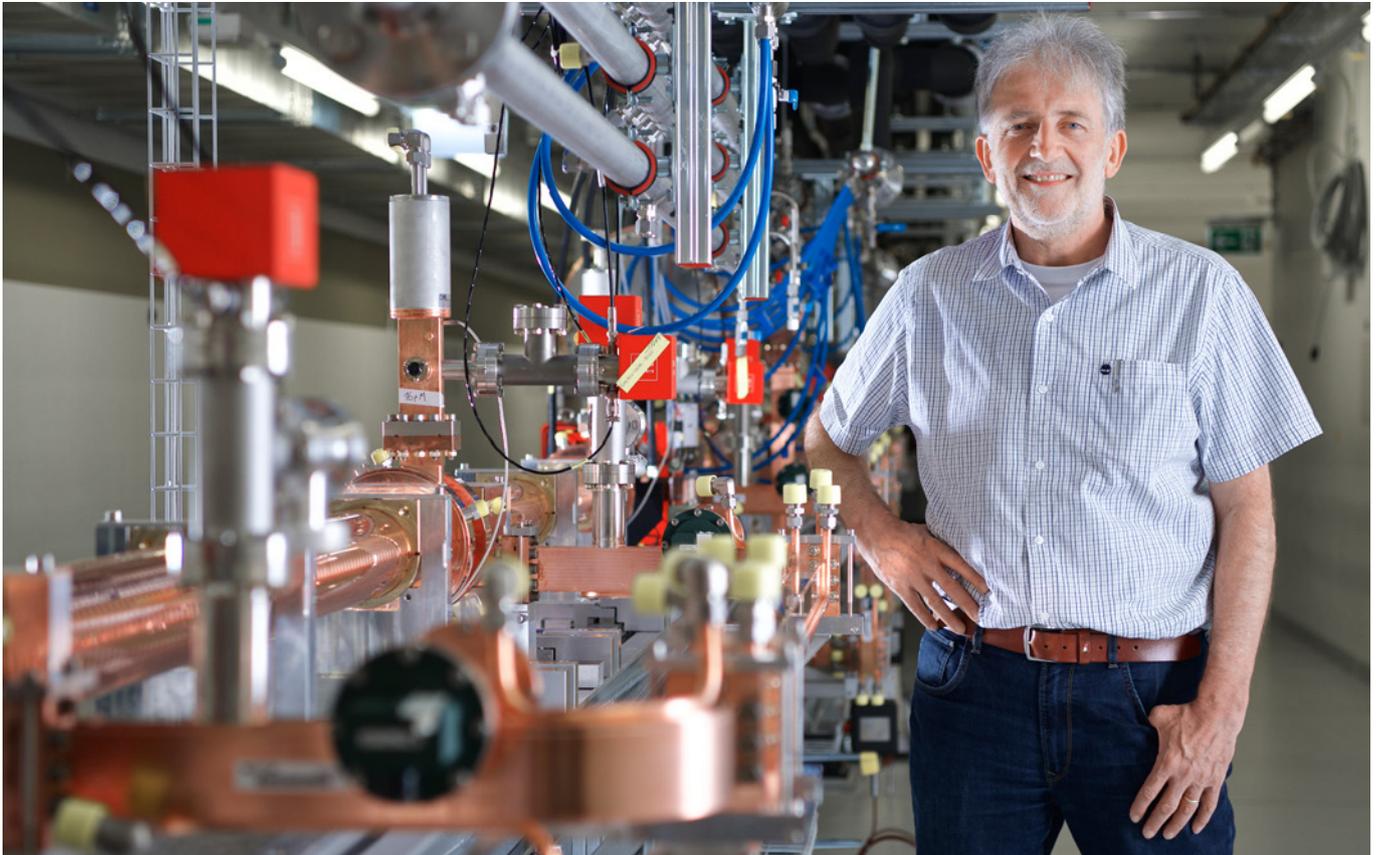
Die bauliche und technische Umsetzung des SwissFEL sind ebenso Neuland wie seine künftige Forschung. Das Gebäude ist ein Präzisionsbau fern der üblichen Standards. Und auch die meisten seiner Maschinenteile lassen sich nicht einfach so am Markt kaufen, sondern müssen speziell für den SwissFEL entwickelt werden. Rund 1400 Unternehmen sind an der Realisierung der Hightech-Anlage beteiligt. Etwa 20 000 Aufträge wurden in den Jahren 2012 bis 2015 vergeben. Die Auftragssummen liegen zwischen ein paar Schweizer Franken und mehreren hunderttausend. In Einzelfällen gehen sie sogar in die Millionen.

Für Peter Ming heisst es hier, Erfahrung mit Flexibilität zu verbinden. Neuland verträgt sich nicht mit Routine. Es ist ein Land, das es erst zu entdecken gilt und wo hinter

jedem Hügel etwas bisher nie Dagewesenes warten kann. Dementsprechend herausfordernd ist das Qualitätsmanagement. So hat er in der Auftragsbeschreibung für die komplexen SwissFEL-Maschinenteile keineswegs nur die technischen Anforderungen bis ins Detail formuliert. Auch die Abwicklung vom Kick-off bis zur Lieferung hat er trotz des unbekanntem Terrains in klaren Schritten vordefiniert. Ohne dabei zu vergessen, dass es auch den Raum braucht, austarieren zu können, wenn die gewünschte Entwicklung auf Abwege zu gleiten scheint. «Das muss jedoch immer entlang von Fakten, nie des Gefühls geschehen», lässt Ming hier kein Missverständnis aufkommen.

Zwischen Freiheit und Regeln gratwandern

Vorausschauend Planen und Austarieren, wenn es nötig ist – diese Aufgaben verlangen nach der hohen Kunst der Balance. Denn Qualitätsmanagement heisst auch, zwischen «so wenig wie möglich und so viel wie notwendig» gratzuwandern – eine Überspezifikation behindert das Vorschreiten eines Projekts genauso wie eine zu vage Beschreibung der Anforderungen.



Mit dem Bau des Freie-Elektronen-Röntgenlasers SwissFEL betritt das PSI Neuland. Dies stellt das Qualitätsmanagement vor besondere Herausforderungen. Peter Ming, hier im SwissFEL-Strahlkanal, meistert sie mit fernöstlicher Gelassenheit.

Hier das richtige Mass zu finden, erfordert viel Kommunikation mit allen an einem Projekt Beteiligten sowie sorgfältiges Abwägen: «Zur richtigen Zeit die richtigen Fragen zu stellen, die Diskussion zu suchen und den Blick auf das Ganze nie zu verlieren ist matchentscheidend.» Diese Balance zwischen Freiheit und Regeln sieht Ming als Schlüssel zu einem erfolgreichen Projekt, aber ebenso zu einer erfolgreichen Unternehmenskultur.

Die Suche nach der Balance in der Einheit des Ganzen – unter dem Blick von Peter Ming erinnert Qualitätsmanagement fast ein wenig an fernöstliche Philosophien. Der Weg ist das Ziel und das Ziel wird auch im Qualitätsmanagement nie ganz erreicht. Mit jedem Projekt lernt Peter Ming etwas für das nächste. Nie bleibt etwas unhinterfragt. Mit zunehmender Erfahrung wird die Suche jedoch immer gelassener.

Und wenn es mit der Gelassenheit einmal nicht so klappt, hilft ein kühlender Sprung in die Fluten der das PSI teilenden Aare oder eine – apropos fernöstliche Philosophien – entspannende Yoga-Stunde in der Mittagspause. In der Ruhe liegt ja bekanntlich die Kraft oder, um es mit Peter Ming weniger prosaisch auszudrücken: «Yoga ist sackstark.» Und seine blauen Augen leuchten.



Interview Oksana Zaharko

Ein neues Instrument für das PSI

Frau Zaharko, Sie bauen am Paul Scherrer Institut das neue Instrument namens Zebra. Was ist das für ein Instrument?

Es ist eine grosse Maschine. Ungefähr so gross wie ein Auto. Und damit kann man untersuchen, wie Materialien im Inneren aufgebaut sind. Man platziert eine Probe in der Maschine und schickt einen Strahl von Teilchen – Neutronen aus der Neutronenquelle des PSI – hindurch. Der Strahl, der aus der Probe rauskommt, enthält dann sehr viel Information darüber, wie das Material aufgebaut ist. Für Fachleute ist Zebra ein Einkristall-Neutronen-Diffraktometer.

Und wie kommt es zu seinem Namen Zebra?

So ein Instrument ist zum einen ein Arbeitspferd, das robust sein und zuverlässig arbeiten muss. Gleichzeitig ist es etwas Neues, und man hat Phantasie gebraucht, um es zu entwickeln. Und da hat Zebra gut gepasst: Es ist in der Schweiz exotisch, aber trotzdem eine Art Pferd.

Welche Dinge kann man damit herausbekommen?

Verstehen, wie der Stoff aufgebaut ist: Aus welchen Atomen – den Bausteinen der

Materie – er besteht und wie diese Atome angeordnet sind. Manche Atome verhalten sich auch wie kleine Magnete, und da können wir sehen, wie sie ausgerichtet sind. Das Ziel ist, zu verstehen, wie die Eigenschaften der Materialien zustande kommen.

Welche Eigenschaften können das sein?

Wir können zum Beispiel untersuchen, warum manche Materialien Magnete sind. Oder Supraleiter, das heisst, warum sie Strom ohne Verlust leiten können. Solche Fragen stehen am Anfang vieler technologischer Entwicklungen, die am Ende in technischen Geräten genutzt werden: im Energiesektor, in elektronischen Bauteilen und vielen anderen Anwendungen.

Woher kommt die Idee, was für ein Instrument man bauen will?

Zum einen von den Nutzern, den Forschern von anderen Institutionen, die hierherkommen, um zu experimentieren. Sie kommen mit Ideen für Experimente und dann müssen wir schon mal sagen: «Das ist interessant, aber mit dem Instrument, das wir jetzt haben, können wir das nicht.» Gleichzeitig sind wir hier selbst auch Wissenschaftler und haben Ideen und merken, dass wir sie nicht umsetzen können.

Und wenn die Idee dann da ist?

Dann müssen wir vom Laborleiter bis zum Direktor Kollegen auf allen Ebenen im Institut überzeugen, die einen besseren Überblick haben und einschätzen können, ob das Instrument in die Gesamtstrategie passt. Denn wir brauchen Geld. Der Schweizerische Nationalfonds betreibt zwar ein Programm mit dem Namen R'Equip, das Schweizer Institute dabei unterstützt, wissenschaftliche Anlagen zu erneuern. Aber das finanziert nur die Hälfte der Kosten. Der Rest muss aus dem PSI kommen. Und wir brauchen Manpower: also die Zeit von Kolleginnen und Kollegen hier am PSI, die an dem Projekt arbeiten werden.

Wo brauchen Sie die Unterstützung ihrer Kollegen?

Wir haben zum Beispiel Konstrukteure, die alle Teile von Zebra bis zum kleinsten Detail entwerfen. Für Teile, die man nicht kaufen kann, müssen sie genaue Pläne machen und wir geben die Teile in Auftrag. Zum Beispiel an die PSI-Werkstatt. Hier arbeiten dann Elektroniker und Mechaniker an dem Projekt. Oder wir geben es an eine spezielle Firma. Aber das sind wirklich sehr komplexe Dinge, und da muss man erst eine Firma finden, die das kann und

es so billig wie möglich und so gut wie möglich macht. Da steckt eine Menge Arbeit drin.

Suchen Sie dann nach den Firmen, die das umsetzen können?

Nein, ich bin die wissenschaftliche Managerin; in dem Projekt gibt es einen technischen Manager, der das macht. Früher haben wir probiert, Instrumente so zu entwickeln, dass der Wissenschaftler alles gemacht hat. Das war nicht sehr effizient, man musste zwei, drei Jobs parallel machen und hatte dabei zunächst nicht das nötige Knowhow. Jetzt bin ich der Antrieb, aber um die Umsetzung kümmern sich dann die technischen Kollegen. Sie geben die Dinge in Auftrag und schauen dann am Ende auch, ob alle Details da sind. Dafür ist jetzt die Kommunikation zwischen den Beteiligten noch wichtiger geworden. Denn es reicht oft nicht, dass ich die technischen Angaben durchgebe. Die Bauteile sind so komplex, dass sich die Kollegen voll auf die technischen Details konzentrieren und schon mal das grosse Ganze aus dem Blick verlieren. Deswegen muss ich dabei sein und notfalls eingreifen und sagen «Stopp, Stopp. Nicht vergessen, dass wir am Ende Wissenschaft damit machen wollen.»

Sind es mehrheitlich Schweizer Firmen, mit denen Sie zusammenarbeiten?

Wir versuchen, die meisten Teile in der Nähe zu beschaffen und in der Regel funktioniert das auch. Ich habe nicht gewusst, dass es so viele gute Firmen hier in der Nähe gibt. Das ist wirklich Hightech. Nur manchmal bestellen wir Komponenten weit weg im Ausland, wenn es dort eine Firma gibt, die genau die Teile baut, die wir brauchen, und wir sie so nicht selbst entwickeln müssen.

In welchem Stadium ist Zebra jetzt?

Mitte Mai geht die Neutronenquelle des PSI nach einer mehrmonatigen Pause wieder in Betrieb, da wird das Instrument fertig sein, und wir können anfangen, es zu testen. Anfang Juni sollen die ersten Nutzer kommen. Damit das klappt, mussten wir einen sehr strengen Zeitplan umsetzen. Eine ziemliche Herausforderung bei so einem komplexen Gerät. Auch weil man nicht immer einschätzen kann, wie viele Probleme es geben wird. Einmal haben wir bei einer Firma zwei identische Teile bestellt. Eines passte dann perfekt, das zweite nicht. Da mussten wir entscheiden: Was machen wir damit? Müssen wir es zurückschicken? Was aber Zeit kostet. Oder versuchen wir es erstmal selbst anzupassen?

Wird Zebra das beste Instrument seiner Art weltweit sein?

Das kann man nicht so einfach sagen. Wir wollen eine Nische für uns finden und in der Nische die Besten sein. Zum Beispiel wollen wir führend sein, wenn es um Experimente geht, bei denen man nur kleine Proben des Materials hat, das man untersuchen will, und bei denen sich die Probe während der Messung in einem starken Magnetfeld befindet. Da ist es zum Beispiel wichtig, dass wir auch die entsprechenden Magnete haben. Es kommt also

nicht nur auf das Instrument selbst an. Wenn wir sagen, es gibt 100 Sachen, die die Leistungsfähigkeit unserer Maschine ausmachen, dann steht das Instrument an sich vielleicht für 20. Zu den anderen 80 gehören zum Beispiel die Neutronenquelle, die Probenumgebung – also die Magnete oder Geräte, mit denen wir die Proben während des Experiments stark kühlen können – oder die Software. Und wir am PSI müssen auch dafür sorgen, dass alles zusammenpasst und den Bedürfnissen der einzelnen Nutzer entspricht. Manchmal fühle ich mich wie eine Fluglotsin, die alles koordinieren muss, damit wir am Ende genau da landen, wo wir wollen.

Für Sie ist es das erste technische Projekt dieser Art. Haben Sie Gefallen daran gefunden?

Ich finde es sehr interessant, weil ich hier Menschen zusammenbringe, die sehr verschieden denken – Wissenschaftler, Techniker, Finanzfachleute. Und es hilft mir, Dinge realistisch zu sehen. Als Wissenschaftlerin denkt man an die Forschung, die man machen möchte, und stellt sich vor, welche Geräte man dafür bräuchte. Hier sehe ich die Realität: was die Dinge kosten, wie aufwändig es ist, die Sachen aufzubauen. Das finde ich interessant und sehr nützlich.

Zur Person

Oksana Zaharko stammt aus der Ukraine. Dort hat sie an der Iwan-Franko-Universität in Lwiw Festkörperchemie studiert. Nach der Promotion kam sie über die Stationen Warschau und Mainz Ende der 90er Jahre nach Zürich an das Institut für Angewandte Physik der ETH Zürich. Seit 1998 arbeitet sie im Labor für Neutronenstreuung am Paul Scherrer Institut und leitet dort seit 2016 die Gruppe Neutronendiffraktion. Sie ist verheiratet und hat einen Sohn. In ihrer Freizeit geht sie gerne wandern, klettern oder Ski fahren.

Vierzig Jahre Forschung am Zellwachstum

Den Tumor aushungern

Vierzig Jahre lang hat Kurt Ballmer-Hofer sich in die Frage hineingearbeitet, wie Zellen wachsen. Eine wichtige Basis der Krebsforschung, denn bei Krebserkrankungen wachsen unerwünschte Zellen unkontrollierbar.

«Mitte der Siebzigerjahre, als ich in die Forschung eintrat, begann man gerade erst, grundsätzliche Dinge über Vorgänge in den Zellen zu verstehen. Beispielsweise, wie ein Virus Zellen dazu bringt, zu wachsen und gleichzeitig neue Viren zu produzieren», erinnert sich der Chemiker und langjährige Gruppenleiter am Labor für Biomolekulare Forschung am Paul Scherrer Institut. Genauso unklar war, warum Krebszellen beginnen zu wuchern. Normalerweise stoppen Zellen ihr Wachstum nach jeder Zellteilung, bis sie über Botenstoffe wieder zu Wachstum und Teilung aufgefordert werden. Aber Krebs kann dieses Stoppsignal abstellen. Nur wie?

Hilfreiche Hefe

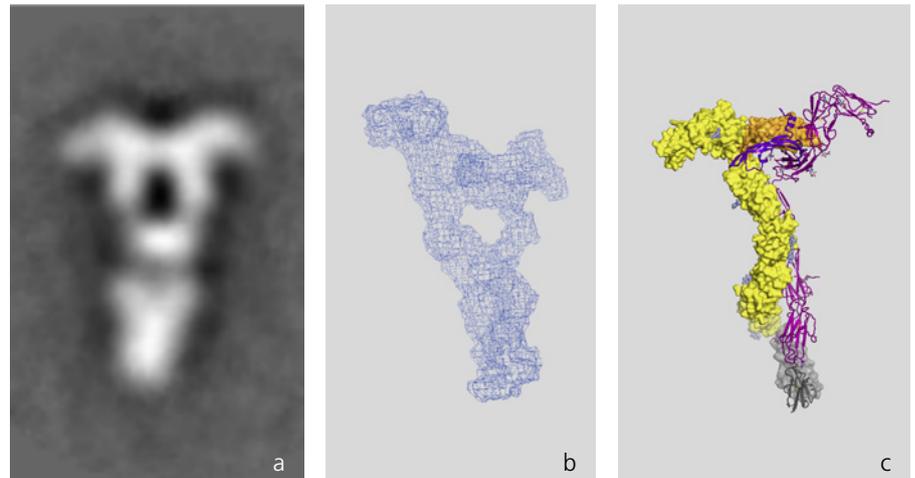
Als Ballmer-Hofer 1997 ans PSI kam, hatte er den Auftrag, sich auf den Botenstoff VEGF (siehe Kasten) zu konzentrieren. Man hatte beobachtet, dass Tumore die Bildung von VEGF auslösen. Der VEGF regt dann wiederum die Bildung neuer Blutgefässe an, die

der Tumor zu seiner Ernährung benötigt. Seit über dreissig Jahren kursiert deshalb die Idee, die Bildung von Blutgefässen im Tumor zu blockieren, um ihn «auszuhungern».

25 betreute Doktoranden, zehn Postdoktoranden und zwanzig eigene PSI-Forschlerjahre später weiss Ballmer-Hofer so viel über Gestalt und Funktionsweise von VEGF, dass

neue Möglichkeiten einer Behandlung greifbar sind. Ziel ist, die Funktion des durch VEGF aktivierten Rezeptors zu blockieren und damit die Bildung von Blutgefässen zu unterbinden.

Die Herstellung von VEGF ist delikat. Viele Forschungsgruppen haben sich daran die Zähne ausgebissen. Auch einer von



Drei Bilder der gleichen Proteinmoleküle (VEGF an den Rezeptor gebunden), die über die letzten acht Jahre mit unterschiedlichen Untersuchungsverfahren erzeugt wurden. Die Forschenden konnten über die Jahre die Proteine in immer besserer Qualität herstellen und dadurch immer ausgefeiltere Untersuchungsverfahren einsetzen, die jeweils detailliertere Bilder des Moleküls erzeugen. Das Bild links wurde vor acht Jahren mit einem damals hochmodernen Elektronenmikroskop erzeugt, die beiden anderen an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS – das mittlere vor fünf Jahren mit Kleinwinkelstreuung, das rechte dieses Jahr mit Proteinkristallografie. (Quelle: PSI / Kurt Ballmer-Hofer)



PAUL SCHERRER INSTITUT
PSI
BALLMER KURT
FORSCHUNGLABOR

Ballmer-Hofers Doktoranden am PSI probierte viele Methoden erfolglos durch. «Schliesslich fiel ihm eine Vorlesung über *Pichia Pastoris* wieder ein, eine Hefe, die auf verrottendem Holz gedeiht.» Volltreffer. Innerhalb weniger Wochen konnte er VEGF in grossen Mengen in Hefe herstellen. Der Ertrag wurde in einem speziell umgebauten Fermenter weiter optimiert. Dieser Fermenter sei heute das am besten amortisierte Gerät in seinem Labor, bemerkt Ballmer-Hofer. Seine Gruppe konnte dank ihrem Knowhow diverse Forschungsgruppen mit VEGF versorgen und so interessante wissenschaftliche Kollaborationen eingehen.

Nun konnte man darangehen, die Struktur des VEGF-Moleküls und von dessen Rezeptoren zu entschlüsseln. Biochemisch betrachtet ist VEGF ein Protein. Proteine ähneln einer zusammengeknüllten Perlenkette. Sie bestehen aus einer Aneinanderreihung verschiedener Aminosäuren. Diese Aminosäuren – die Perlen – stossen sich teilweise gegenseitig ab, während sich andere gegenseitig anziehen. So kann die Kette nur eine genau definierte gefaltete Form annehmen. Und nur wenn die Faltung stimmt, kann das VEGF an den Rezeptor der Zelle binden und den Befehl zur Bildung neuer Blutgefässe übermitteln. Kennt man

die nötige Form der beteiligten Moleküle, kann man Gegenmittel entwickeln, die diese Bindung verhindern.

Anfangs ging das mühsam voran. Durch biochemische und mikroskopische Analysen bestimmte man, wie einzelne Aminosäuren des Rezeptors dessen Verhalten beeinflussen, und studierte, wie Zellen auf VEGF reagieren.

Mittlerweile war am PSI die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS errichtet worden. Die SLS ist eine Art riesiges Mikroskop, in dem mittels Röntgenlicht winzigste Strukturen abgebildet werden können, so auch VEGF und dessen Rezeptoren.

Das dreidimensionale Bild solcher Strukturen entsteht aber nur, wenn es gelingt, unzählige Moleküle zu kristallisieren, sie also starr in ein regelmässiges Kristallgitter einzubetten. Dies gelang im Falle des VEGF lange Zeit nicht. Man behalf sich deshalb mit einer weniger hochauflösenden Methode, der Elektronenmikroskopie. «Wir haben Tausende von Rohbildern im Elektronenmikroskop gemacht und daraus Bilder gemittelt», so Ballmer-Hofer.

Unerwartetes Ergebnis

Dann kam es zur grossen Überraschung: Das VEGF verbindet sich nicht nur direkt mit

dem Rezeptor, sondern es bildet sich eine Art «8» mit zwei weiteren Verbindungsstellen zwischen den gebundenen Rezeptoren. Ballmer-Hofer begeistert das noch immer: «Das macht Wissenschaft interessant: Wenn nicht das erwartete Resultat eintritt. Wenn die Natur einem widerspricht.» Blockierte man diese weiteren Verbindungen, tat auch die Blutgefässzelle nicht, was die Krebszelle von ihr verlangte. Auch die Kristalluntersuchung gelang schliesslich doch noch. Ein Doktorand konnte Kristalle herstellen, als er die VEGF mit einem anderen Rezeptor kombinierte. Und mit neuesten Tricks konnte eine Postdoktorandin mit Hilfe dieser Kristalle an der SLS die Struktur der VEGF-Moleküle bestimmen.

Der nächste Schritt ist nun, ein Molekül zu finden, das den Rezeptor selbst in seiner Funktion stört. «In Zellkultur haben wir das schon geschafft. Jetzt wollen wir zeigen, dass das auch bei Tieren funktioniert.» Dann rückt eine mögliche klinische Anwendung näher. Ballmer-Hofer selbst wird das dann bereits aus der Perspektive des Pensionärs weiterverfolgen.

Originalveröffentlichung:

Thermodynamic and structural description of allosterically regulated VEGF receptor 2 dimerization

Brozzo, M.S. et al., *Blood* **119**, 1781–1788 (2012)

VEGF (Vascular Endothelial Growth Factor) ist ein Botenstoff, der produziert wird, wenn in einem Organ neue Blut- oder Lymphgefässe benötigt werden. Er bindet an einen speziellen Rezeptor an der Aussenseite von Endothelzellen, den Zellen, die die Blutgefässe auskleiden. Dockt VEGF an den Rezeptor, ändert dieser seine Struktur und löst im Zellinneren eine chemische Reaktion aus. Diese veranlasst die Zelle dazu, sich zu teilen und zum Wachstum neuer Gefässe beizutragen.

Computertomografie im Nanometer-Massstab

Zoom in den Knochen

Als das wenige Millimeter kleine Knochenstückchen zu Marianne Liebi Forschungsobjekt wurde, hatte es schon eine Vorgeschichte in der Wissenschaft hinter sich. An dieser war Liebi nicht beteiligt, und doch kann sie davon erzählen, da die Geschichte sozusagen im Nachbarlabor spielt: Das winzige Knochenfragment war ursprünglich Teil eines grösseren Stücks menschlichen Knochenwirbels gewesen. Dieses Stück hatte ein Forschungsteam, bestehend aus Knochen-Biomechanikern der ETH Zürich und der Universität Southampton, England, am PSI untersucht. Die Wissenschaftler nutzten das hochintensive Röntgenlicht der

Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS, um den Wirbelknochen zu durchleuchten.

Millimeter: Das Geflecht

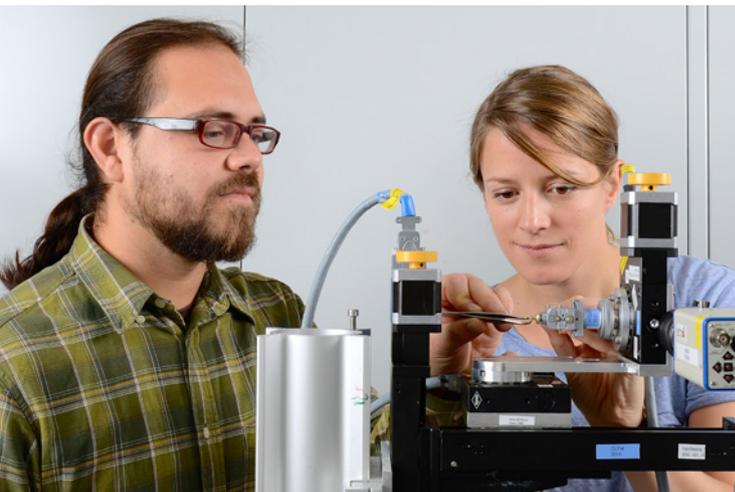
Rückenwirbel bestehen im Inneren aus einem mikroskopisch-luftigen Knochengeflecht, das an einen Schwamm erinnert oder auch an eine Hecke. Bei Menschen mit Osteoporose hat diese Hecke deutlich weniger Zweige, ist also stark gelichtet. Mithilfe der sogenannten Knochendichtemessung wird dies heutzutage standardmässig beziffert. Bei gesunden Menschen jedoch ist dieses dreidimensionale Geflecht dicht und stabil und kann zugleich einen Sturz abpuffern. Doch wie genau macht es das?

Um dieser Frage nachzugehen, nutzten die Knochen-Biomechaniker ein Verfahren, das auf demselben Prinzip beruht wie dasjenige der medizinischen Computertomografie. Während sich

allerdings in Krankenhäusern das Röntgengerät um den Patienten herum bewegt, wird an der SLS der Forschungsgegenstand um seine eigene Achse gedreht und dadurch nach und nach von allen Seiten durchleuchtet. Das intensive Röntgenlicht sowie Detektoren mit hoher Pixelzahl ermöglichen hochaufgelöste Bilder der Probe.

Das dreidimensionale Bild des mikroskopischen Knochengeflechts, das die Forschenden mit dieser tomografischen Methode erhielten, sollte jedoch erst der Anfang ihrer Untersuchung sein. Als Nächstes spannten die Forschenden den Knochen zwischen zwei Platten ein, um langsam einen steigenden Druck auszuüben. Zugleich nahmen sie fortlaufend tomografische Bilder auf. So entstand ein 3-D-Daumenkino davon, wie die feinen Verästelungen in der Knochenhecke unter dem Druck brachen. Die Bildsequenz zeigte, dass dies nicht gleichmässig geschah. Stattdessen dienten einzelne Schichten im Knochengeflecht als eine Art Knautschzone: Hier zersplitterten die kleinen Knochen-Ästchen, während darum herum der Knochen intakt blieb.

Zufrieden mit ihrem Experiment hatten die Forschenden nun einen nicht mehr intakten Knochen abzugeben. Marianne Liebi und ihre Kollegen waren an den wenige



Manuel Guizar-Sicairos und Marianne Liebi positionieren ein Knochenstück in ihrer experimentellen Apparatur.

Millimeter kleinen Knochen-Ästchen interessiert und bekamen einige der Fragmente.

Mikrometer: Die Ordnung der Fasern

Die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS ist eine kreisrunde Grossforschungsanlage, die mehr als 20 unterschiedlich spezialisierte Experimentierbereiche mit Röntgenlicht versorgt. Von dem Experimentierplatz aus, an dem der Belastungstest des ursprünglichen Knochenstücks stattgefunden hatte, sind es nur wenige Schritte bis zu der Strahllinie, an der unter anderem Marianne Liebi arbeitet.

Hier stehen ein besonders eng gebündelter Röntgenstrahl sowie hochempfindliche Detektoren zur Verfügung. Hier haben zudem die Forschenden eine Methode entwickelt, aus der gestreuten Röntgenstrahlung detaillierte Informationen über die Nanostruktur einer Probe zu erhalten. Dies ermöglichte es Liebi, noch eine Stufe weiter in den Knochen hineinzuzoomen. Knochen bestehen aus winzigen Fasern, aus sogenannten Kollagenfibrillen. Die Anordnung dieser Fasern wollten Liebi und ihre Kollegen abbilden.

Liebi klebte also das rund zweieinhalb Millimeter kleine Knochenstückchen auf die Spitze eines Stäbchens, auf dem es wie ein unförmiger Stecknadelkopf thronte. Der Röntgenstrahl an Liebis Experimentierplatz ist so fein, dass er Punkt für Punkt über die Probe geführt wird. Rasterförmig durchleuchtet der Strahl die Probe, im Computer entsteht aus den so gewonnenen Daten zunächst ein zweidimensionales Bild des Knochens und seiner Eigenschaften auf der Nanometer-Skala.

Nun wollten Liebi und ihre Kollegen eine weitere Besonderheit einführen: Die Kombination aus dieser Raster-Messung mit einer to-

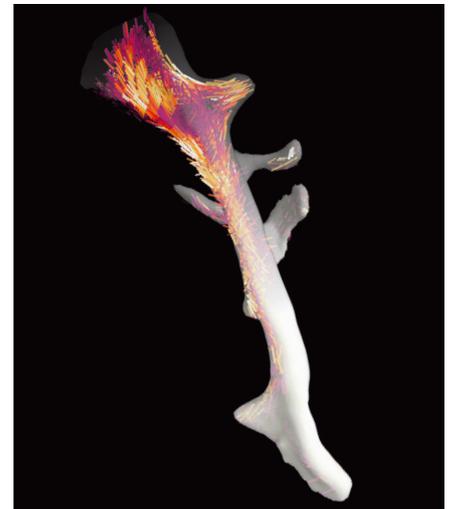
mografischen und somit dreidimensionalen Bildgebung. Also wurde das Stäbchen mitsamt daraufsitzendem Knochen stückweise um die eigene Achse gedreht, während dazwischen einzelne Rasteraufnahmen gewonnen wurden.

Allerdings gab es noch kein Computerprogramm, das mit diesen komplexen Daten und den enthaltenen Informationen zur Nanostruktur der Probe umgehen und daraus ein dreidimensionales Tomografiebild rekonstruieren konnte.

Nanometer: Die Kollagenfibrillen

Also machte sich Liebi mit Unterstützung ihres Kollegen Manuel Guizar-Sicairos daran, eine eigene Software zu entwickeln. Liebi, die in Lebensmittelwissenschaften promoviert hatte, bevor sie ans PSI kam, legte sich nun Programmierkenntnisse zu. Mehr als ein Jahr und viele Zeilen Computerprogramm später war es so weit. Liebi liess ihre Daten durch den neuen Algorithmus laufen – und vor ihren Augen baute sich am Computerbildschirm ein dreidimensionales Bild der inneren Nanostruktur des Knochens auf.

«Ich war beeindruckt, wie genau das Bild unseren Erwartungen entsprach», erinnert sich Liebi. Im äusseren Bereich bestand das Knöchelchen aus wohlgeordneten Fasern, die entlang des Knochens ausgerichtet waren. Im Inneren dagegen lagen die Fasern kreuz und quer. In der Kombination ergibt sich auch auf dieser kleinsten Ebene eine stabile und zugleich flexible Knochenstruktur. Bei bestimmten Knochenkrankheiten dagegen ist diese Ordnung der nanometerfeinen Kollagenfibrillen gestört; beispielsweise bei Rachitis und Kleinwuchs, womöglich auch – zusätzlich zur verringerten Knochendichte – bei Osteoporose.



Der Knochen und seine Nanostruktur: Dank ihrer neuen Auswertungsmethode konnten die Forschenden die Ausrichtung der winzigen Kollagenfibrillen in diesem rund zweieinhalb Millimeter langen Knochenstück kartieren. (Quelle: PSI / Marianne Liebi)

Mit der von Liebi entwickelten Methode ist der Grundstein für eine neue Abbildungstechnik gelegt. Nicht nur Knochen und ihre Erkrankungen lassen sich damit untersuchen, auch an Proben aus menschlichen Zähnen wurde die Methode schon erfolgreich angewandt. Liebi selbst sieht gute Chancen für viele weitere biologische Proben. Und noch etwas stimmt die Wissenschaftler zuversichtlich: Auch die heute so etablierte Computertomografie begann einst mit einem Prototyp in der Forschung.

Originalveröffentlichung:

Nanostructure surveys on macroscopic specimens by small-angle scattering tensor tomography

M. Liebi, M. Georgiadis, A. Menzel, P. Schneider, J. Kohlbrecher, O. Bunk and M. Guizar-Sicairos, *Nature* **527**, 349–352 (2015)



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 PSI 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 μS

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 μS (sprich: es-mü-es) erzeugt.

Protonenbeschleunigeranlage

Die Neutronen aus der SINQ, die Myonen aus der μS sowie die Myonen- und Pionenstrahlen für Teilchenphysikexperimente entstehen, wenn ein Strahl schneller Pro-

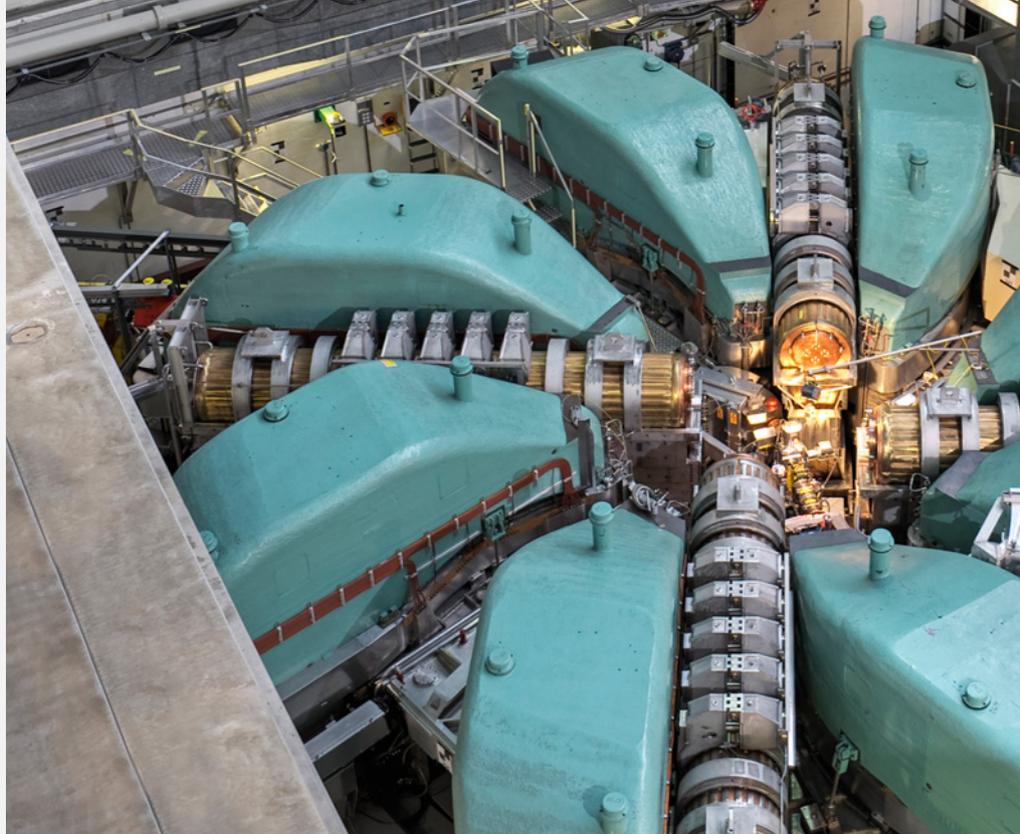
tonen auf einen Block eines speziellen Materials trifft. Der Protonenstrahl wird in der Protonenbeschleunigeranlage des PSI erzeugt. Hier werden die Protonen auf fast 80 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

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 – 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. Die ersten Pilotexperimente sind für 2017 geplant.



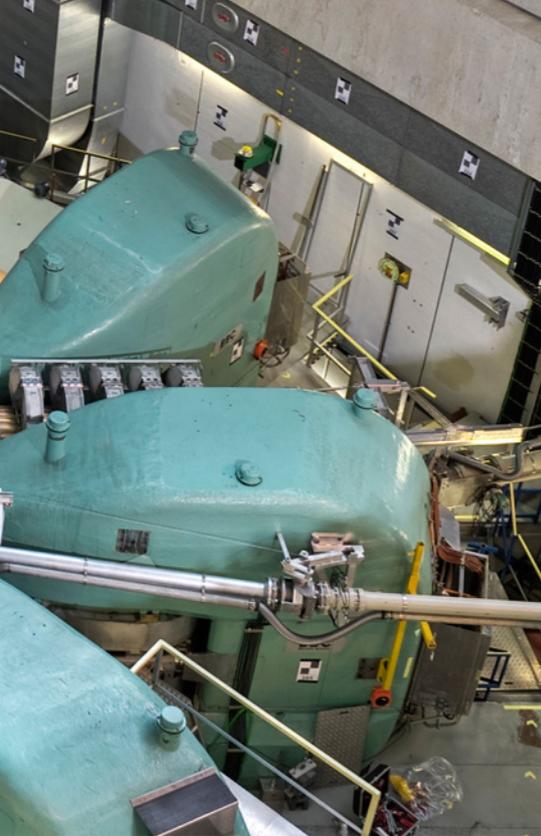
Blick auf den grossen Protonenbeschleuniger, der einen Umfang von rund 48 Metern hat.

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

eigenen 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 μS – eine Kombination von Anlagen, die es weltweit nur noch an ganz



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 2015 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.

wenigen weiteren Orten 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 – auch diese stehen externen Forschern offen.

Die Forschungsschwerpunkte des PSI

Das Paul Scherrer Institut PSI ist das grösste naturwissenschaftliche Forschungszentrum der Schweiz. Nahezu 800 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 supra-leitend 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 treiben 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 CO₂-freie Energieversorgung eingesetzt werden können.

PSI-Forschende arbeiten an Verfahren zur CO₂-neutralen Erzeugung von Energieträgern – sei es mithilfe 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 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 2015

	Mio. CHF	%
Erträge für Forschung, Lehre und Betrieb der Grossforschungsanlagen		
Aus Trägerfinanzierung	308,8	76,0
Schulgelder und andere Benutzungsgebühren	1,3	0,3
Forschungsbeiträge, -aufträge und wissenschaftliche Dienstleistungen		
– wirtschaftsorientierte		
Forschung (Privatwirtschaft)	14,6	3,6
– SNF, KTI, Ressortforschung		
Bund	27,2	7,0
– EU-Programme	6,5	1,6
– übrige projektorientierte		
Drittmittel	16,4	4,1
Schenkungen und Legate	1,5	0,4
Übrige Erträge	28,1	7,0
Total	404,4	100,0

Aufwand und Investitionen

Personalaufwand*	237,7
Sachaufwand**	83,5
Investitionen* in Sachanlagen	97,3

Weitergehende Finanzinformationen finden Sie in unserem Geschäftsbericht***.

* inklusive SwissFEL

** ohne Beitrag an Unterbringung

*** <http://psi.ch/X4ua>

Der Aufwand verteilt 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

Das PSI hatte Ende 2015 rund 2000 Mitarbeitende. Davon war ein Viertel Postdocs, Doktorierende und Lernende. Insgesamt sind 39,5 Prozent der Stellen mit wissenschaftlichem Personal besetzt. 49 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. 7,5 Prozent der Stellen sind der Administration zugeordnet. 26 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 prüft 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 2/2016
Paul Scherrer Institut, Mai 2016
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,
Christian Heid, Dr. Laura Hennemann,
Dr. Paul Piwnicki (Ltg.)

Gestaltung und Layout: PSI

Bildbearbeitung:
Mahir Dzambegovic, Markus Fischer

Originalveröffentlichung zum Beitrag
Betonkrebs auf Seite 6 links:
**Application of micro X-ray diffraction
to investigate the reaction products
formed by the alkali-silica reaction in
concrete structures**
R. Dähn, A. Arakcheeva, Ph. Schaub,
P. Pattison, G. Chapuis, D. Grolimund,
E. Wieland and A. Leemann, *Cement and
Concrete Research* **79**, 49–56 (2016)

Originalveröffentlichung zum Beitrag
Matterhorn auf Seite 7 links:
**The ascent of high resolution and high
volume 3D replication**
R. Kirchner, H. Schift, *Nature Structural &
Microelectronic Engineering* **141**, 243–244
(2015)

Legenden für ganzseitige Bilder:

Seite 3: An der Baustelle des neuen
Neutroneninstrumentes Zebra an der
Neutronenspallationsquelle SINQ des
PSI: Oksana Zaharko, wissenschaftliche
Managerin des Projekts, und Matti Forster,
technischer Manager.

Seite 12: Die Forscherin Oksana Zaharko
ist für Entwicklung und Aufbau des
neuen Messplatzes Zebra an der
Neutronenspallationsquelle SINQ des PSI
verantwortlich. An dem neuen Messplatz
werden Forschende neuartige Experimente
zu aktuellen Fragestellungen der
Materialforschung durchführen.

Seite 16: Kurt Ballmer-Hofer erforscht die
molekularen Mechanismen, die die Bildung
neuer Blutgefässe anregen. Mit dem Wissen
sollen Mittel entwickelt werden, die Tumore
von der Blutversorgung abschneiden und so
gewissermassen aushungern.

Unser wichtigstes Kapital am PSI ist die herausragende Qualifikation, Erfahrung
und Motivation unserer Mitarbeitenden. Um diesem, in der Sprache der Wirt-
schaftswissenschaftler «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.

Seite 20: Luftaufnahme des Paul Scherrer
Instituts.

Fotoaufnahmen:
Alle Fotos Scanderbeg Sauer Photography
ausser Seite 6 links, 11, 18, 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.psfiforum.ch

iLab – Das Schülerlabor des
Paul Scherrer Instituts
Dr. Beat Henrich
Telefon +41 56 310 53 57
ilab@psi.ch, www.ilab-psi.ch

Mehr über das PSI lesen Sie auf
www.psi.ch

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 2500 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 2000 Mitarbeitende. Damit sind wir das grösste Forschungsinstitut der Schweiz.

PAUL SCHERRER INSTITUT

