

SCHWERPUNKTTHEMA

# DAS PSI IN ZAHLEN

Das Magazin des Paul Scherrer Instituts

01 / 2021

# 203125

47° 32' 15" Nord, 8° 13' 30" Ost

342 000  
Quadratmeter  
PSI-Areal



## SCHWERPUNKTTHEMA: DAS PSI IN ZAHLEN

### DAS PSI IN ZAHLEN

## Die Menschen, das Areal und die Forschung

Rund 2100 Menschen, darunter um die 800 Forschende mit 61 verschiedenen Nationalitäten, arbeiten am PSI. Sie machen das mehr als 34 Hektar grosse Institutsgelände zu einem ganz besonderen Ort für die Wissenschaft. Beeindruckende und überraschende Zahlen geben einen Einblick in den PSI-Betrieb und in die hier stattfindende Forschung.

Seite 10

1

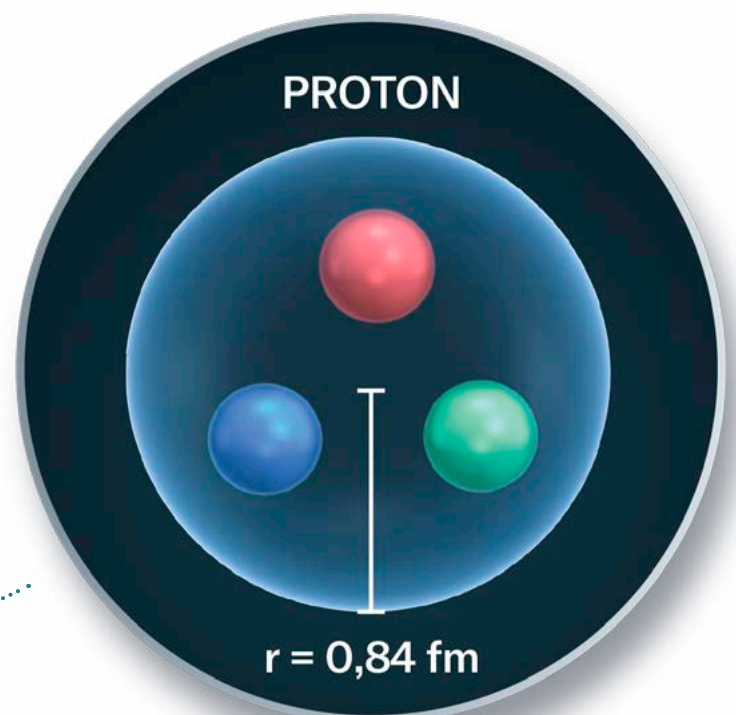
### INTERVIEW

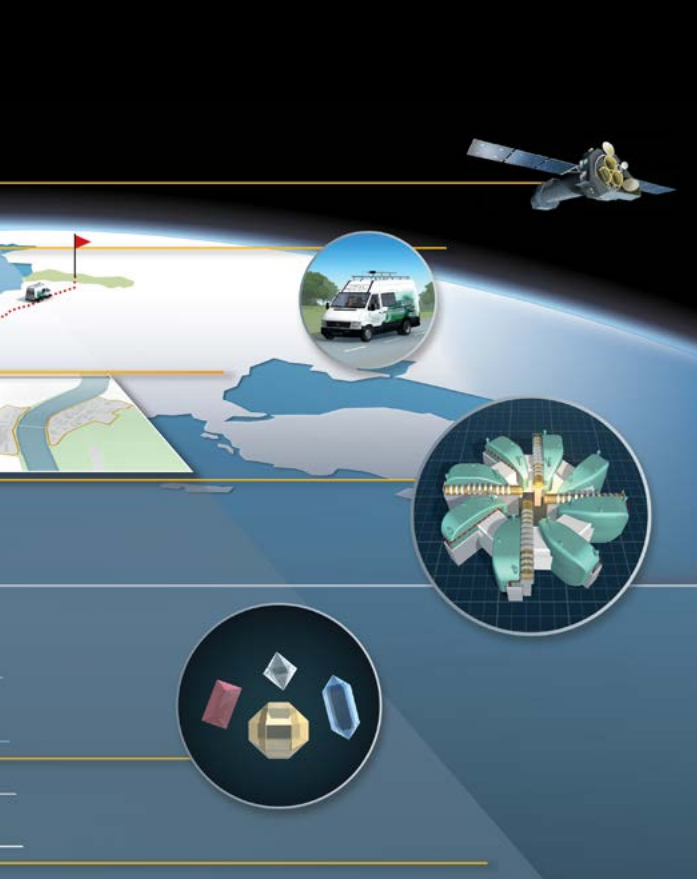
## «Zahlen helfen uns, besser zu werden.»

Peter Allenspach kennt fast jeden der 900 Büro- und 1000 Laborräume auf dem PSI-Areal. Als Leiter des Bereichs Logistik hat er viele der Kennzahlen des PSI im Blick. Zum Beispiel, dass das PSI 100 Prozent erneuerbaren Strom verbraucht und das SwissFEL-Gebäude auf einen halben Zentimeter genau gebaut werden musste.

Seite 20

3





2

DAS PSI IN ZAHLEN

## Dimensionen am PSI

PSI-Forschende beobachten kleinste Teilchen, aus denen die Welt und auch der Mensch besteht, oder entwickeln hochempfindliche Messgeräte für Weltraummissionen. Die Spannweite der zugehörigen Dimensionen lädt zu einer erstaunlichen Reise durch die Grössenordnungen ein.

Seite 18

### INHALT

#### NACHGEFRAGT

Was machen Sie da, Herr Rüegg? 4

#### ALLTAG

Geheimnisvolle Kraft 6

#### FORSCHUNG

Mikroroboter 7



SCHWERPUNKTTHEMA:  
DAS PSI IN ZAHLEN

8



DAS PSI IN ZAHLEN

Die Menschen, das Areal und  
die Forschung

10



DAS PSI IN ZAHLEN

Dimensionen am PSI

18



INTERVIEW

«Zahlen helfen uns, besser  
zu werden.»

20

#### IM BILD

Katalytische Prozesse 21

#### IN DER SCHWEIZ

Für eine Million Jahre sicher verwahrt 22

Das PSI hilft dabei, den besten Standort für ein  
sicheres Tiefenlager für radioaktiven Abfall zu ermitteln.

#### IN KÜRZE

Aktuelles aus der PSI-Forschung 26

- 1 Das kalte Gedächtnis der Erde
- 2 Medikamente gegen Covid-19
- 3 Ultraschnelle Tumorthherapie
- 4 Steuerbare Nanowirbel

#### GALERIE

Sportliche Forschende 28

Viele Forschende am PSI gehen in ihrer Freizeit einer  
ganz eigenen sportlichen Leidenschaft nach.

#### ZUR PERSON

Mit Sprachen und Struktur zur Lösung 34

Am PSI leistete Carolina Arboleda Clavijo einen wichtigen  
Beitrag zur Früherkennung von Brustkrebs, heute  
hält sie Schulungen in ganz Europa in fünf Sprachen.

#### WIR ÜBER UNS


38

#### IMPRESSUM

40

#### AUSBLICK

41



**2116** Menschen  
sind insgesamt am PSI angestellt.

# Was machen Sie da, Herr Rüegg?

Die Arbeit am PSI hat sehr oft mit Zahlen zu tun: In der Forschung wird etwas vermessen und beziffert. Doch auch die hiesige Infrastruktur und die Menschen, die hier arbeiten, lassen sich quantifizieren. Christian Rüegg hat als Wissenschaftler und nun Direktor des Paul Scherrer Instituts viele Arten von Zahlen im Blick.

NACHGEFRAGT

### Herr Rüegg, welche Zahl beschreibt das PSI Ihrer Meinung nach am besten?

Oh, jetzt sollte ich sicherlich sagen: **5232!** Weil das unsere PSI-eigene Postleitzahl ist und darum auch der Titel dieses Magazins. Mit dieser Zahl findet man uns in der Schweiz. Aber ich will ehrlich sein: Für mich am wichtigsten sind die Menschen, die hier arbeiten. Darum wähle ich die **2116** als die Zahl der Mitarbeitenden laut aktueller Statistik. Dazu kommen eigentlich noch einige Hundert, die an der ETH Zürich, ETH Lausanne EPFL oder den Universitäten angestellt sind. Wir sind also wie ein Dorf. Tatsächlich hat die Gemeinde Villigen gleich neben dem PSI ziemlich genau so viele Einwohner wie wir Angestellte. Doch es gibt noch viele weitere schöne Zahlen bei uns. Für die Wissenschaft sind Fachartikel sehr wichtig. Darin veröffentlichen wir unsere Forschungsergebnisse, teilen sie so anderen Experten mit sowie der Öffentlichkeit. Pro Jahr erscheinen rund **1500** solcher Fachtexte von PSI-Forschenden. Das ist eine beachtliche Zahl, auf die wir durchaus stolz sind.

### In der Forschung selbst hat man ja auch mit Zahlen zu tun.

Richtig. Zahlen, Statistiken, Standardabweichungen zählen zum Alltag in der Forschung. Eine besondere Zahl, die wir am PSI herausgefunden haben, ist übrigens der Durchmesser des Protons, einer der fundamentalen Bausteine aller Atome. Unsere Messungen haben gezeigt, dass das Proton etwas kleiner ist als zuvor gedacht, nämlich **0,0000000000000084184** Meter klein. Der zuvor angenommene Wert enthielt hinten statt der **8418** eine **8768**. Der Unterschied klingt so weit nach dem Komma vernachlässigbar, aber tatsächlich ist er extrem wichtig, denn vieles in den Naturwissenschaften baut genau auf der Genauigkeit dieser und anderer Zahlen auf.

### Geht es am PSI oft um solche winzigen Dinge?

Das ist durchaus eine unserer Spezialitäten, denn wir sind – und das mag zunächst widersprüchlich klingen – für unsere Grossforschungsanlagen bekannt, darunter die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS, der Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL, die Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ und die Schweizer Myonenquelle SpS. In der Wissenschaft gibt es eine Art umgekehrte Verhältnismässigkeit: Um die kleinsten Dinge genau vermessen zu können, braucht man sehr grosse, leistungsstarke Anlagen. Darum ist der SwissFEL **740** Meter lang und damit unser grösstes Gebäude. In der SLS haben die Elektronen, die die Röntgenstrahlung erzeugen, eine Energie von **2,4** Milliarden Elektronenvolt. In einer anderen Anlage haben wir einen Protonenbeschleuniger mit **8** Magneten, von denen jeder **240** Tonnen wiegt – zusammen entspricht das dem Gewicht von rund **100** mittelgrossen Lastwagen. Unsere dort beschleunigten Protonen halten einen Weltrekord: **1,4** Megawatt ist ihre kombinierte Energie, also die Energie von rund **23 000** Glühbirnen. An der SpS erzeugen wir übrigens **500** Milliarden Myonen pro Sekunde, auch das ist weltweit einmalig. Wieder anderswo haben wir Messinstrumente, an denen wir uns winzige Strukturen eines Materials anschauen und dabei **30 000** Bilder pro Sekunde aufzeichnen können, das sind **625** Mal mehr Bilder als für aufwendig produzierte Kinofilme pro Sekunde aufgenommen werden. Kurz: Zahlen sind ein guter Blickwinkel, um das PSI zu verstehen.

# Geheimnisvolle Kraft

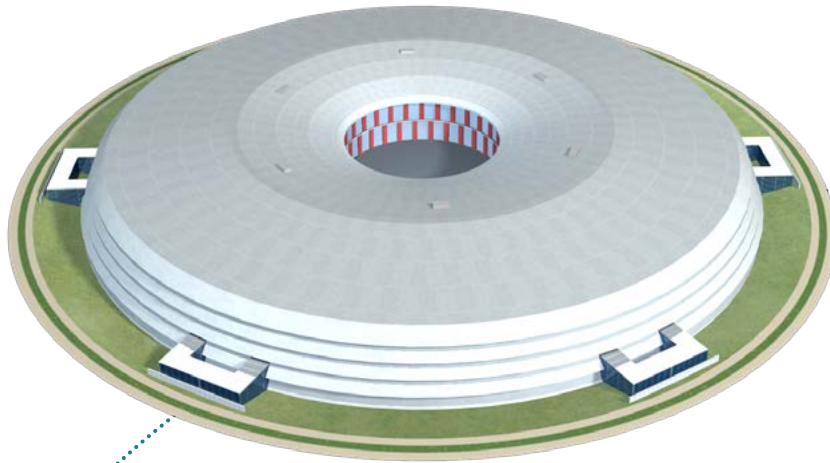
Magnetismus begegnet uns viel häufiger, als uns bewusst ist: Sticker für die Kühlschrankschranktür. Schraubendreher oder -schlüssel, die Schrauben und Muttern festhalten. Verschlüsse von Handy-Etuis. Oder auch ein Hufeisenmagnet, mit dem wir metallische Gegenstände einsammeln. Sie alle funktionieren über die beinahe magisch wirkende Kraft des Magnetismus. Wer einmal versucht hat, die beiden Nord- oder Südpole zweier noch so kleiner Magnete aneinander zu drücken, kennt die enorme Kraft, die darin steckt. Die vielleicht wichtigste Folge des Magnetismus umgibt uns jederzeit und doch nehmen wir sie nicht bewusst wahr. Im Inneren der Erde steckt ein Supermagnet, der im Wesentlichen das Magnetfeld unseres Planeten erzeugt. Wir alle profitieren davon, nicht nur, weil wir uns mittels eines Kompasses darin orientieren können, sondern vor allem, weil uns dieses Magnetfeld vor dem Sonnenwind schützt. Das Magnetfeld der Erde leitet diesen gewaltigen Strom geladener Teilchen, den unser Zentralgestirn permanent auf uns abfeuert, wie ein grosser Schutzschirm ab.





# Mikroroboter

Am PSI werden Magnetfelder intensiv erforscht und neue Anwendungen für Magnetismus entwickelt. Eine davon: Mikroroboter. Forschende haben eine Mikromaschine in Form eines Vogels entwickelt, die unter anderem kleine Nanomagnete enthält. Diese Nanomagnete können so programmiert werden, dass sie eine bestimmte magnetische Ausrichtung annehmen. Wenn die programmierten Nanomagnete dann einem Magnetfeld ausgesetzt werden, wirken spezifische Kräfte auf sie. Befinden sich die Magnete in flexiblen Bauteilen, dann führen die auf sie wirkenden Kräfte zu einer Bewegung. Die Nanomagnete lassen sich immer wieder neu programmieren. Das führt zu jeweils unterschiedlichen Kräften, die auf die Konstruktion wirken, und neuen Bewegungen. Der «Vogel» aus diesem Material kann verschiedene Bewegungen ausführen, beispielsweise flattern, rütteln, sich umdrehen oder zur Seite gleiten. Solche nur wenige Mikrometer messende Maschinen könnten beispielsweise im menschlichen Körper eingesetzt werden, um kleine Operationen durchzuführen.



1

#### DAS PSI IN ZAHLEN

Die Menschen, das Areal  
und die Forschung

Seite 10

SCHWERPUNKTTHEMA

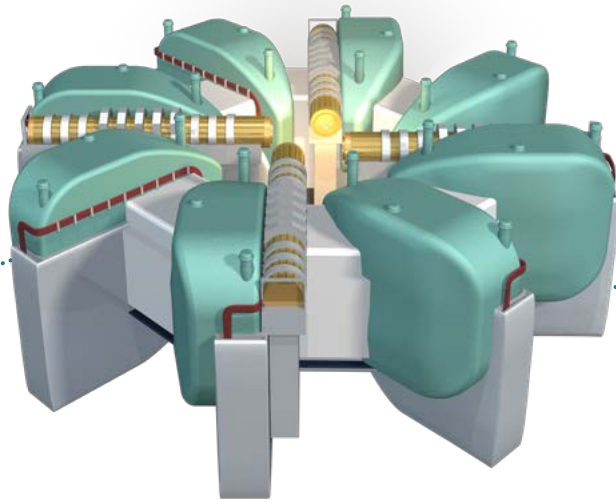
## Das PSI in Zahlen

Am PSI vermessen Forschende komplexe Biomoleküle, kleinste Strukturen in neuen Materialien oder sogar die Bausteine der Atome. Aber nicht nur dabei fallen Unmengen von Zahlen an; die Mitarbeitenden, das Areal, die Forschungsgeräte und der Wissenschaftsbetrieb am PSI lassen sich ebenfalls quantifizieren. Von unvorstellbar klein bis wahrlich gewaltig reichen die Kennziffern dieses Forschungsinstituts an der Aare.

Autorin: Laura Hennemann







DAS PSI IN ZAHLEN  
Dimensionen am PSI  
Seite 18

2

3

INTERVIEW  
«Zahlen helfen uns,  
besser zu werden.»  
Seite 20



# Menschen am PSI

Rund **2100** Menschen  
sind insgesamt am PSI angestellt.

**42,9 Jahre**

beträgt der Altersdurchschnitt am PSI.



**9** Dienstjahre verbringen  
Mitarbeitende im Durchschnitt am PSI.

**12 Jahre** arbeiten im Schnitt  
wissenschaftliche Mitarbeitende am PSI,

**11 Jahre** Techniker.



**16%** aller PSI-Angestellten  
arbeiten in Teilzeit.

**40%** der Angestellten  
in der Administration  
arbeiten in Teilzeit.

**137** Angestellte im Bereich  
Informatik

**193**  
Administration

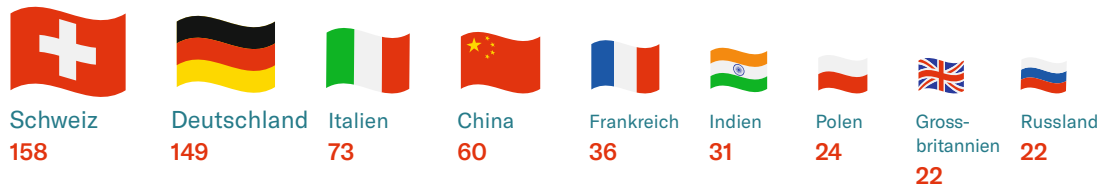
**804**  
Forschung



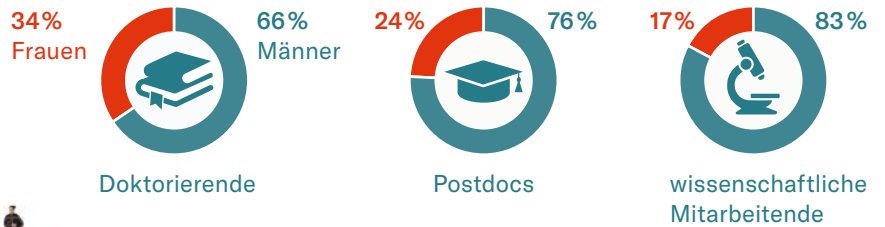
### Forschende aus aller Welt

Forschende mit insgesamt 61 verschiedenen Nationalitäten arbeiten am PSI (dunkel gefärbte Länder).

### Die häufigsten Nationalitäten unter den Forschenden



### Männer und Frauen in der Forschung



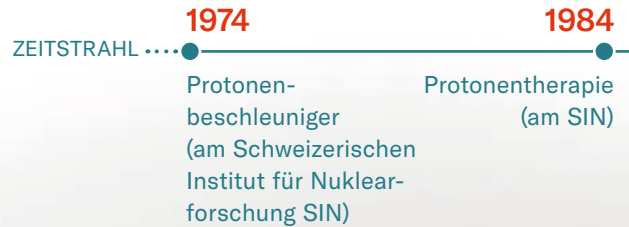
### Zu Besuch am PSI

- Rund 11 500** Personen aus der Bevölkerung besuchen pro Jahr das PSI.
- 2992** Jugendliche besuchten 2019 das Schülerlabor iLab.
- 2532** Gastforschende kamen 2019 für ihre Experimente ans PSI.
- 374** Personen mit Tumoren wurden 2019 am Zentrum für Protonentherapie ZPT behandelt.

**982**  
Technik

Zahlen: Stand 31.12.2019

# Das PSI-Areal




 **5232** lautet die **einmalige Postleitzahl** des PSI.

**342 000 qm** beträgt die gesamte Arealfläche des PSI, das entspricht 48 Fussballfeldern.

**150 000 qm** haben alle Räume und Flure des PSI zusammengenommen.

**1000** Laborräume gibt es insgesamt.

**900** Büroräume gibt es insgesamt.

 **17 500** IT-Geräte sind am Netz (Computer, Laptops, Laborrechner, Steuerungen für Anlagen etc.).

 **605** WLAN-Access-Points


 **3548** Telefone

**120 Gebäude** stehen auf dem PSI-Gelände.

 **Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS**

Zentrum für Protonentherapie ZPT

 **Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ**

 **Schweizer Forschungsinfrastruktur für Teilchenphysik CHRISP und Schweizer Myonenquelle SpS**

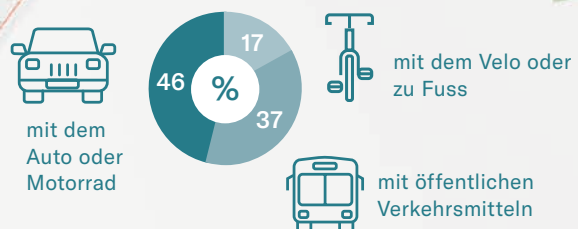
Protonenbeschleuniger

47° 32' 15" Nord, 8° 13' 30" Ost

**190 m** lang ist die Brücke zwischen PSI Ost und West.

**456 Meter** Umfang hat das Gebäude der SLS.

## Wie kommen die Mitarbeitenden ans PSI?





**1988**  
Gründung des PSI als Zusammenschluss des Eidgenössischen Instituts für Reaktorforschung EIR und des SIN; benannt nach dem Schweizer Physiker Paul Scherrer (1890 bis 1969)

**1996**  
Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ  
Myonenspin-Rotation-Anlage  $\mu$ SR; wurde mit der Zeit erweitert und umbenannt in: Schweizer Myonenquelle SpS

**2001**  
Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS

**2008**  
Schülerlabor iLab

**2016**  
Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL

AARE



**75 m**

hoch ist das höchste Objekt am PSI: ein Abluftkamin. Ganz oben ist ein Nistkasten für Turmfalken angebracht, der jedes Jahr von einem Brutpaar genutzt wird.

AREAL OST



**35%**

der PSI-eigenen Fahrzeugflotte sind elektrisch.



**48**

Lademöglichkeiten für E-Autos hat das PSI.



Schülerlabor iLab



**950**  
Mittagessen werden pro Arbeitstag im Schnitt serviert.

**72**

Liter Kaffee werden täglich am PSI ausgeschenkt. Das entspricht pro Jahr 18000 Liter Kaffee, mit denen sich knapp das Mangroven-Aquarium des Tierparks Bern füllen liesse.



Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL



**740 Meter**

lang ist das längste und zugleich grösste Gebäude am PSI: der SwissFEL.

**93 500 Kubikmeter**

Volumen hat der SwissFEL. Das entspricht ca. 120 Einfamilienhäusern.



**500 000 m**

Kupferkabel

und

**600 000 m**

Glasfaserverbindungen

sind am Röntgenlaser SwissFEL verlegt; das ist jeweils länger als die Ost-West-Ausdehnung der Schweiz.



# Forschung am PSI

**1900**

Studien werden an den Grossforschungsanlagen des PSI jedes Jahr ungefähr durchgeführt.



**1500**

Fachartikel von PSI-Forschenden erscheinen jährlich in etwa.

**400 000**

Laborhandschuhe werden am PSI pro Jahr verbraucht.



**100**

aktive Patentfamilien hat das PSI in etwa. Zu einer «Familie» gehören alte Patente, die auf dieselbe Erfindung zurückgehen. Hinzu kommen weitere rund 150 Patentfamilien, die nicht verlängert wurden.

**17**

derzeitige Spin-offs sind aus der PSI-Forschung hervorgegangen.



**5**

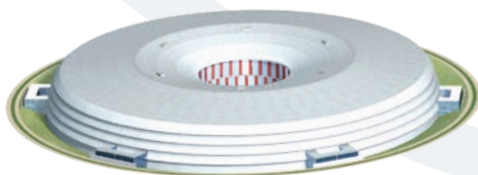
**Grossforschungsanlagen hat das PSI.**  
An diesen gibt es insgesamt rund ...

**40**

Messplätze, an denen gleichzeitig Experimente durchgeführt werden können.



**SLS**



**2,4 Milliarden Elektronenvolt**

Energie haben die Elektronen, die im Speicherring der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS kreisen. Sie erzeugen das Röntgenlicht, welches wiederum für Experimente genutzt wird. Hiermit lässt sich die Nanostruktur von Materialien abbilden, können elektronische oder magnetische Eigenschaften neuer Materialien vermessen sowie die Struktur von Proteinen untersucht werden. Mehr als **7300** Proteinstrukturen wurden insgesamt an der SLS bereits entschlüsselt, seit die Anlage 2001 in Betrieb ging.

Um die **5 Petabyte**

neue Daten werden jährlich am PSI abgespeichert. Das entspricht in etwa der Speicherkapazität von **einer Million DVDs**.

Rund **250 Terabyte**

Rohdaten produziert die Vermessung eines Proteins am SwissFEL. Das entspricht der Datenmenge, die auf **mehr als 53 000 DVDs** passt.



**SwissFEL**



**6 Milliarden Elektronenvolt**

Energie haben die Elektronen am Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL, bevor sie mittels einer Anordnung von **1060** Magneten auf einen Slalomkurs geschickt werden und dadurch Röntgenlicht für die Experimentierstationen erzeugen. **100** Lichtpulse, von denen jeder nur wenige milliardstel Sekunden dauert, liefert der SwissFEL pro Sekunde. Am SwissFEL können Forschende beispielsweise die Strukturveränderung von Proteinen zeitaufgelöst sichtbar machen.





**6**

Einrichtungen umfasst der ETH-Bereich: Das PSI und drei weitere Forschungsanstalten des Bundes (WSL, Empa, Eawag) sowie die beiden Hochschulen ETH Zürich und ETH Lausanne EPFL.

**25 Petaflop**

beträgt die Rechenleistung des Supercomputers «PIZ Daint» am CSCS. Das bedeutet: **25 Milliarden** Rechenoperationen pro Sekunde.

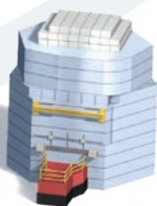
**10 Gigabyte**

Daten pro Sekunde überträgt eine speziell installierte Glasfaserverbindung zwischen dem PSI und dem Supercomputerzentrum CSCS in Lugano. Auch dort wird Rechen- und Speicherkapazität genutzt.

**SINQ**

**Knapp 1 Megawatt**

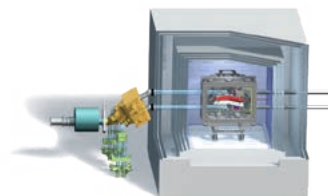
Strahlleistung hat die Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ. Sie liefert **100 Billionen** Neutronen pro Quadratcentimeter und pro Sekunde. Mit Neutronen lassen sich zerstörungsfrei Objekte durchleuchten oder magnetische Nanostrukturen eines Materials untersuchen, und zwar mit einer Auflösung von weniger als **1 Nanometer**. Die Neutronen gelangen mit einer Geschwindigkeit von mehr als **4000 Kilometer pro Stunde** durch bis zu **50 Meter** lange Neutronenleiter zu den verschiedenen Experimentierstationen.



**HIPA**

**590 Millionen Elektronenvolt**

Energie haben die Protonen, die der Protonenbeschleuniger HIPA liefert. Der Protonenstrahl hat **1,4 Megawatt** Leistung. Das ist für einen Protonenstrahl Weltrekord und entspricht der Leistung von rund **23000** Glühbirnen à 60 Watt. Die hier beschleunigten Protonen werden für die SINQ, die SpS sowie für CHRISP genutzt.



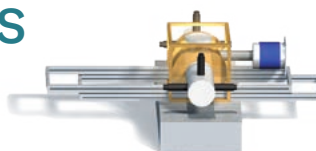
**CHRISP**

**2,196980 millionstel**

Sekunden beträgt die Lebensdauer eines Myons, bevor es in andere Teilchen zerfällt. Solche und andere Präzisionsmessungen werden an der Schweizer Forschungsinfrastruktur für Teilchenphysik CHRISP durchgeführt. Hierzu gehört auch die Ultrakalte Neutronenquelle UCN. Sie erzeugt knapp **1 Milliarde** ultrakalte – also für freie Teilchen extrem langsame – Neutronen; für **8 Sekunden** alle 5 Minuten. An dieser Weltspitzenanlage werden fundamentale Eigenschaften der Neutronen vermessen.



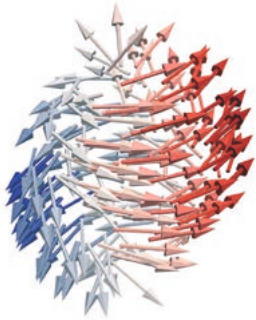
**SpS**



**500 Milliarden**

Myonen erzeugt die Schweizer Myonenquelle SpS pro Sekunde und ist damit weltweit einmalig. An der SpS werden Myonen genutzt, um neue Quantenphänomene in Materialien zu untersuchen. Mit den Myonen lässt sich gezielt in verschiedenen Tiefen blicken: zwischen **1 Nanometer** und **10 Zentimeter**. Die Materialien können einem Druck von maximal **30000 Bar**, extrem hohen Magnetfeldern von bis zu **9,5 Tesla** sowie Temperaturen zwischen **minus 273** und plus **700 Grad Celsius** ausgesetzt werden.

# Forschungsprojekte am PSI



**151 957**

Bildpunkte hatte die hochgenaue, dreidimensionale tomografische Abbildung der magnetischen Strukturen im Inneren einer Probe. Der Abstand zwischen ihnen betrug nur **0,0001** Millimeter. Die eingesetzte Technik – Magnetotomografie mittels harter Röntgenstrahlung – war am PSI selbst entwickelt worden.

## Die Forschungsfelder des PSI

Anteil entsprechend Budget 2019

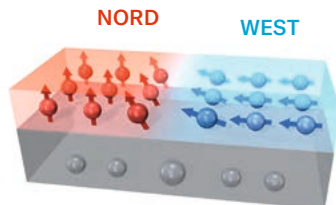
**37%**

**Materialwissenschaften**



**2,34 Nanometer** 

(0,000 00234 Millimeter) beträgt die Wellenlänge des Röntgenlichts, das PSI-Forschende an der SLS nutzten, um die elektronischen Eigenschaften von Materialien zu vermessen. An ihrem 5 Meter langen Spektrometer untersuchten sie eine nur 25 Nanometer dünne Probe aus Strontium-Iridium-Oxid. Diese Experimente sind relevant, um geeignete Materialien für zukünftige elektronische Bauteile zu finden.



**1,6 Nanometer**

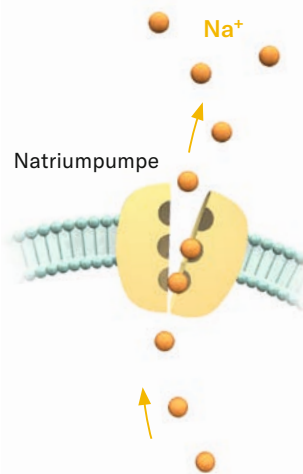
dünn war die Lage aus Kobaltatomen, in denen PSI-Forschende ein besonderes magnetisches Phänomen entdeckten: Wenn eine Gruppe von Kobaltatomen nach Norden ausgerichtet war, zeigte die benachbarte Gruppe infolge davon nach Westen. Ein ungewöhnliches Phänomen, das bei grösseren magnetischen Strukturen nicht vorkommt.

**24%**

**Lebenswissenschaften**

**2,4 Milliarden**

Jahre alte Fossilien sind bereits an der SLS untersucht worden. Die Bilder zeigten fadenförmige Strukturen von Pilzen und bewiesen, dass es diese Lebensform schon viel länger gibt als zuvor angenommen.



**0,16 Nanometer**

betrug die minimale örtliche Auflösung bei der Vermessung eines bestimmten Proteinmoleküls am SwissFEL. Es handelte sich um die molekulare Natriumpumpe von Bakterienzellen. Die PSI-Forschenden konnten dabei unter anderem einen Übergangszustand sichtbar machen, der nur rund **3 billionstel** Sekunden anhält. Die Erkenntnisse sind relevant für die Neurobiologie. Andere SwissFEL-Experimente erlauben sogar eine zeitliche Auflösung von weniger als **50 billionstel** Sekunden.





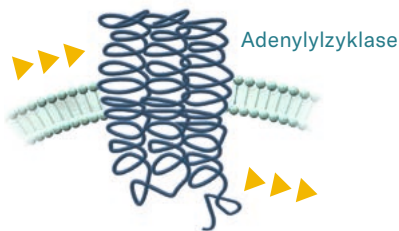
## 0,1 trillionstel Nanometer

liegen die Elementarladungen im Neutron höchstens auseinander – falls überhaupt. So genau wurde am PSI das sogenannte «elektrische Dipolmoment» des Neutrons – der ungeladene Elementarbaustein der Atomkerne – vermessen. **2** Jahre lang lief das Experiment an der Ultrakalten Neutronenquelle UCN. Es dient der Suche nach «neuer Physik» jenseits des Standard-Modells.

## 9% Teilchenphysik

## 11% Nukleare Energie und Sicherheit

## 19% Allgemeine Energie



## Auf -150 Grad Celsius

kühlten PSI-Forschende eine Probe, um mittels Kryoelektronenmikroskopie einen fundamentalen Vorgang in Säugetier-Zellen aufzuklären: einen wichtigen Teil eines Signalweges, der Informationen in eine Zelle überträgt. Den Forschenden gelang eine Momentaufnahme des Proteins namens Adenylylzyklase, dessen Struktur sie mit einer Auflösung von **34** Nanometern bestimmen konnten.

## Weniger als 1 zu 2,4 Billionen

beträgt die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Zerfalls der exotischen Elementarteilchen namens Myonen und ist damit mindestens **500 000** Mal unwahrscheinlicher als sechs Richtige im Schweizer Lotto. Ein PSI-Experiment, das diese Zahl ergab, hilft, physikalische Theorien zu unserem Universum zu überprüfen. **846** spezielle Detektoren für schwache Lichtsignale hatten die Forschenden darin verbaut und damit auf **1 billionstel** Sekunde genau Signale vermessen.

## 60 Prozent

mehr Methan aus Bioabfällen erzeugt ein am PSI entwickelter Prozess in etwa, und nutzt dafür den **40**-Prozent-Anteil Kohlendioxid im Biogas, der ansonsten nicht verwertet wird. Die sogenannte Direkt-Methanisierung setzt dieses CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff direkt zu wertvollem Methan um. Dieser Prozess wurde in einem **1000**-Stunden-Test im Vergär- und Klärwerk Werdhölzli in Zürich erfolgreich erprobt.

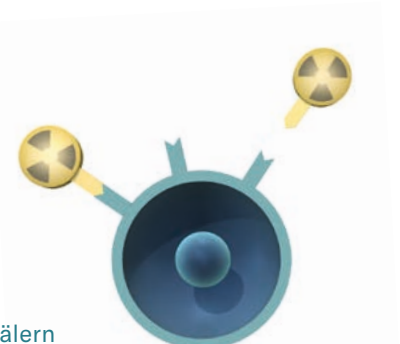


## 233

Parameter lassen sich im Webtool «Carculator» einstellen, das PSI-Forschende entwickelt haben und mit dem sich die Ökobilanz verschiedener Arten von Personenwagen vergleichen lässt. Für die Kalibrierung ihres Programms nutzten die Forschenden die Daten von **15 000** Autos. Das Tool zeigt unter anderem: Elektro-Autos liegen schon heute auf Platz **1**.

## 272

Personen an Schweizer Spitälern wurden im Jahr 2019 mit Krebsmedikamenten behandelt, die am Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaften des PSI hergestellt wurden. Beliefert wurden das Universitätsspital Basel, die Kantonsspitäler Baden und Aarau, die Hirslandenkliniken in Zürich und Luzern sowie das MRI Stadelhofen.



# Dimensionen am PSI

1 000 000 000 m

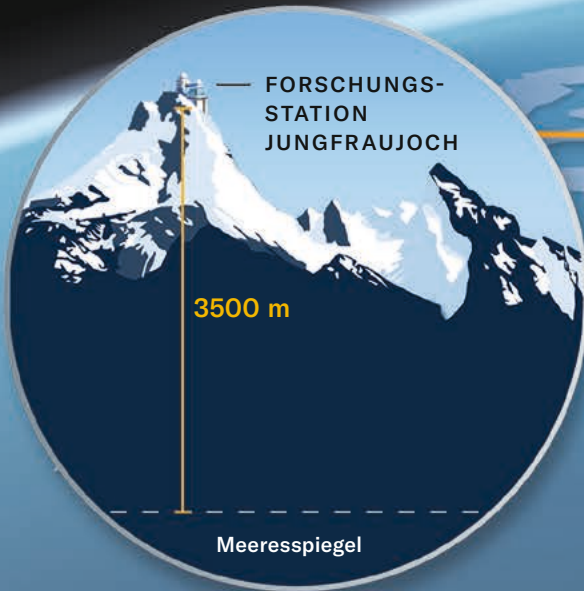
1 000 000 m

1 000 m

100 m

10 m

1 m



**3500 m**

über dem Meer liegt die Forschungsstation Jungfrauoch, wo auch PSI-Forschende Atmosphärenforschung betreiben. Eine der Messreihen läuft schon seit 33 Jahren.

Jungfrauoch PSI

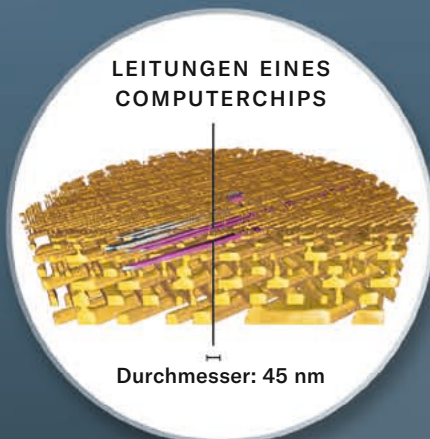
**0,44 m**

44 cm breit ist diese Doppelseite.



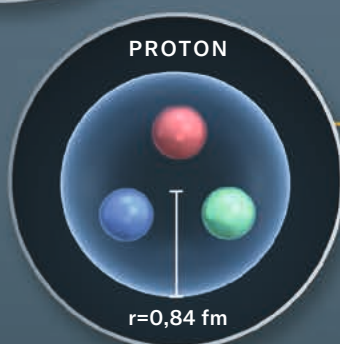
**0,006 m**

Rund 6 mm Durchmesser hat der fokussierte Protonenstrahl, mit dem am Zentrum für Protonentherapie Tumore Punkt für Punkt behandelt werden.



**0,000 000 045 m**

45 Nanometer Durchmesser haben die elektrischen Leitungen eines Computerchips, die in einer 3-D-Visualisierung an der SLS sichtbar gemacht wurden.



**0,000 000 000 000 000 841 84 m**

0,84184 Femtometer beträgt der Ladungsradius – also der halbe Durchmesser – des Protons. Die weltweit bisher genauesten Messungen am PSI haben diesen Wert ergeben.

# 105 665 000 m

105 665 km ist das Weltraumteleskop XMM-Newton auf seiner Bahn maximal von der Erde entfernt. Es wurde vom PSI mitentwickelt und ist seit 1999 im Orbit.



Estland

2200 km

# 725 m

Ost-West-Ausdehnung hat das PSI-Gelände.



Ost

## SMOGMOBIL



# 2200 000 m

2200 km war die weiteste Entfernung (einfache Strecke), die PSI-Forschende mit dem Smogmobil gefahren sind: In Estland untersuchten sie damit Aerosole.

# 15 m

Durchmesser hat das Zyklotron HIPA in der Protonenbeschleunigeranlage.

## RINGBESCHLEUNIGER



Durchmesser: 15 m

0,1 m

0,01 m

0,001 m

0,000 001 m

0,000 000 001 m

0,000 000 000 001 m

0,000 000 000 000 001 m

0,000 000 000 000 000 001 m

## MEMBRAN-PROTEINKRISTALLE



Kantenlänge: 0,1 mm

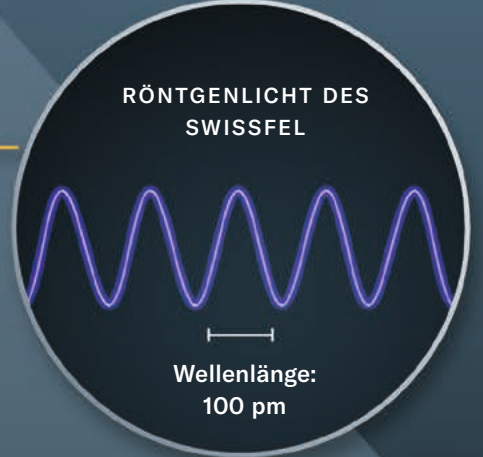
# 0,0001 m

0,1 mm Kantenlänge haben typischerweise die Membranproteinkristalle, deren Proteinstruktur an der SLS untersucht wird.

# 0,000 000 000 1 m

100 Pikometer ist die Wellenlänge des energiereichsten Röntgenlichts, das der SwissFEL für Experimente liefern kann. Je kürzer die Wellenlänge, desto kleiner die Strukturen, die sich damit sichtbar machen lassen.

## RÖNTGENLICHT DES SWISSFEL



Wellenlänge: 100 pm

# «Zahlen helfen uns, besser zu werden.»



Peter Allenspach ist am PSI Leiter des Bereichs Logistik. Durch seine Arbeit hat er die Zahlen, die das PSI beschreiben, stets im Blick.

Interview:  
Laura Hennemann

## Herr Allenspach, gefallen Ihnen die Zahlen des PSI?

Ja, ich finde sie vor allem beeindruckend. Unsere 5 Grossforschungsanlagen, die teilweise weltweit einmalig sind, erfordern nämlich eine ganz eigene Logistik. Beispielsweise müssen wir einsehen: Wenn wir Elektronen auf 99,999998 % Lichtgeschwindigkeit beschleunigen, benötigen wir dafür viel Energie und Kühlwasser. Letzteres sind pro Jahr 5200 000 000 Liter. Ich habe neulich ausgerechnet: Damit liesse sich 5 Mal das Empire State Building füllen. Wir arbeiten allerdings kontinuierlich daran, unseren Bedarf – beispielsweise in puncto Energie – zu optimieren.

## Inwiefern?

Eine meiner Lieblingszahlen ist, dass wir seit 2013 ganze 70 Effizienzoptimierungen erfolgreich umgesetzt haben. Seither sparen wir 6 Gigawattstunden Strom pro Jahr. Zudem konnten wir den Heizenergiebedarf halbieren, unter anderem, indem wir die Abwärme unserer Forschungsanlagen rückgewinnen und nutzen. Noch eine schöne Zahl: 100 % des Stroms, den wir nutzen, kommt aus erneuerbaren Quellen; darauf haben wir 2020 komplett umgestellt. Und von unseren PSI-eigenen Fahrzeugen sind immerhin schon 35 % elektrisch. All diese Dinge zu beziffern hilft uns, gewünschte Entwicklungen voranzutreiben und immer besser zu werden.

## Zu Ihrem Bereich gehört auch die Abteilung Immobilien und Betrieb – kennen Sie eigentlich jeden Winkel des PSI?

Angesichts dessen, dass das Gesamtareal des PSI 342 000 Quadratmeter gross ist, mag es überraschen, aber ja, ich kenne tatsächlich fast jede Ecke. Das liegt vor allem daran, dass ich schon quasi seit der Gründung des PSI hier bin; aber natürlich nicht von Anfang

an als Bereichsleiter. Übrigens haben die Räume und Flure des PSI zusammengerechnet 150 000 Quadratmeter. Es gibt 900 Büros plus 1000 Laborräume; wenn ich die jetzt alle gezielt besuchen würde, sagen wir mal, an jedem Arbeitstag zwei am Vormittag und zwei am Nachmittag, bräuchte ich dafür circa 2 Jahre.

## Und wie entwickeln sich die PSI-Zahlen?

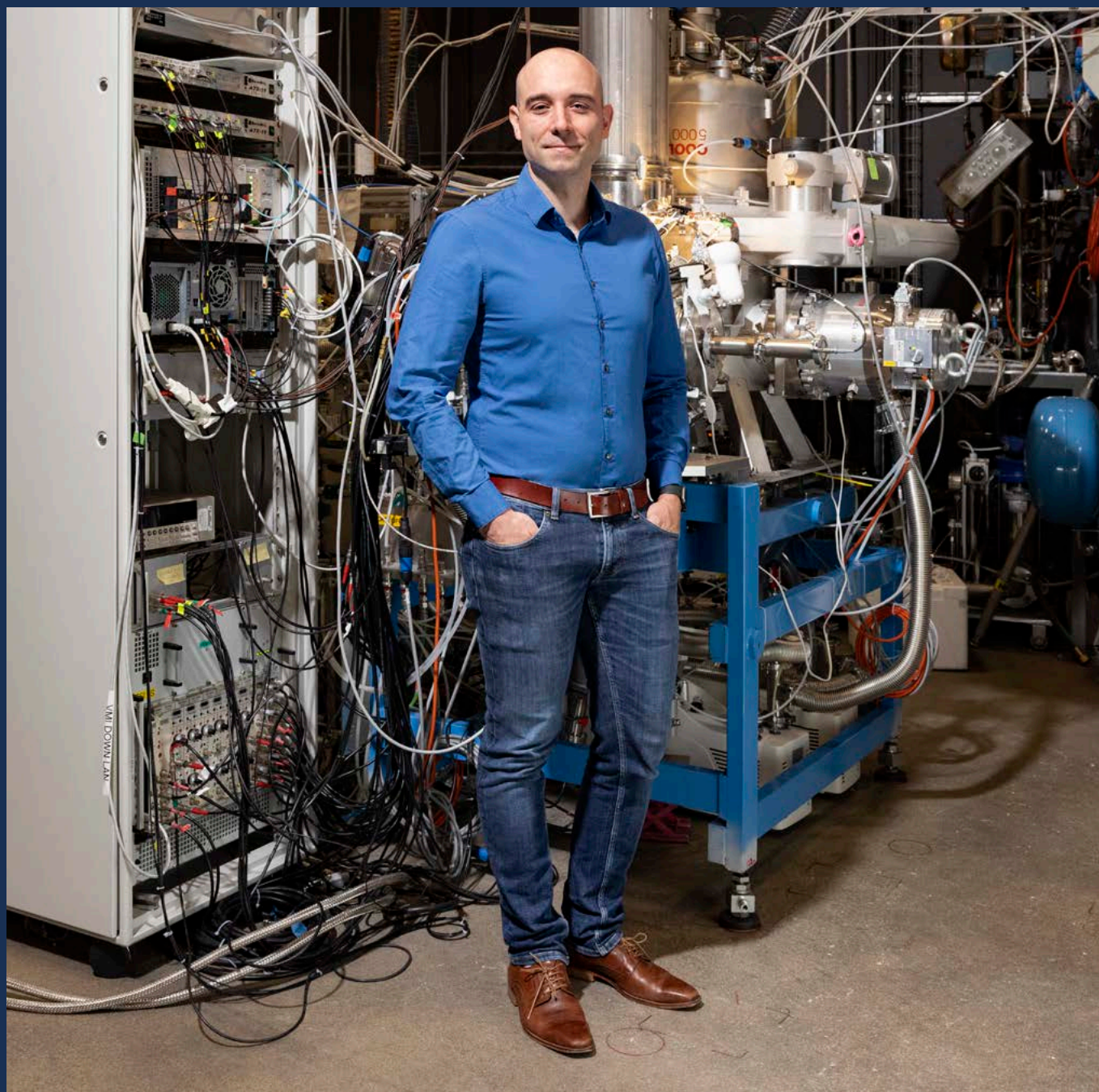
Ich finde: gut! Das PSI ist jetzt 33 Jahre alt. Es entstand 1988 aus dem Zusammenschluss zweier Bundesinstitute, die sich überholt hatten: das Eidgenössische Institut für Reaktorforschung EIR und das Schweizer Institut für Nuklearforschung SIN. In den 1970er-Jahren hatten EIR und SIN rund 46 respektive 12 Gebäude. Inzwischen besitzt das PSI um die 120 Gebäude; das heisst, seit der Gründung des PSI kam jedes Jahr im Schnitt mehr als 1 Neubau hinzu.

## Ist das viel?

Durchaus. Vor allem wenn man bedenkt, dass unsere grösseren Bauprojekte von der Planung bis zur Fertigstellung teilweise mehr als 5 Jahre brauchen. Wir errichten hier ja keine Einfamilienhäuser, sondern einzigartige Gebäude, die jeweils ganz besondere Ansprüche erfüllen müssen. Ein gutes Beispiel ist der SwissFEL. Wegen der hochpräzisen Forschung, die dort durchgeführt wird, musste beim Bau alles auf einen halben Zentimeter genau stimmen. Zum Vergleich: Die sonst übliche Toleranz sind 2 Zentimeter.

## Und ausserhalb des Bereichs Immobilien?

Auch hier verweisen die Zahlen auf erfreuliche Entwicklungen: Die Zahl der PSI-Mitarbeitenden steigt stetig, in den vergangenen 10 Jahren auf das 1,5fache. Die Zahl der Personen, die jährlich ans Zentrum für Protonentherapie des PSI kommen, hat sich inzwischen auf einem hohen Niveau eingependelt: Allein im Jahr 2019 wurden dort 374 Patienten mit Tumoren behandelt. Ähnlich verhält es sich mit den Jugendlichen, die unser Schülerlabor iLab besuchen, das waren 2992 im Jahr 2019. Wobei das gerade vergangene Jahr natürlich etwas anders aussah, denn die Schulschliessungen während der Corona-Pandemie haben auch uns betroffen. Und um den Kreis zu schliessen: Auch neue Gebäude sollen weiterhin entstehen; aktuell planen wir unter anderem ein Laborgebäude, das im Jahr 2024 fertig werden soll. ◆



## Katalytische Prozesse

Patrick Hemberger untersucht an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS chemische Reaktionsmechanismen durch Detektion von extrem kurzlebigen Zwischenprodukten: Sind solche Mechanismen verstanden, lässt sich der katalytische Ablauf so manipulieren, dass mehr von den gewünschten Produkten entsteht. So könnten in Zukunft aus dem pflanzlichen Bestandteil Lignin Treibstoffe gewonnen werden. Im vergangenen Jahr erhielt er den Ružička-Preis auf dem Gebiet der Chemie, der, benannt nach dem Nobelpreisträger Leopold Ružička, zu einem der renommiertesten Preise in der Nachwuchsförderung in der Schweiz zählt.

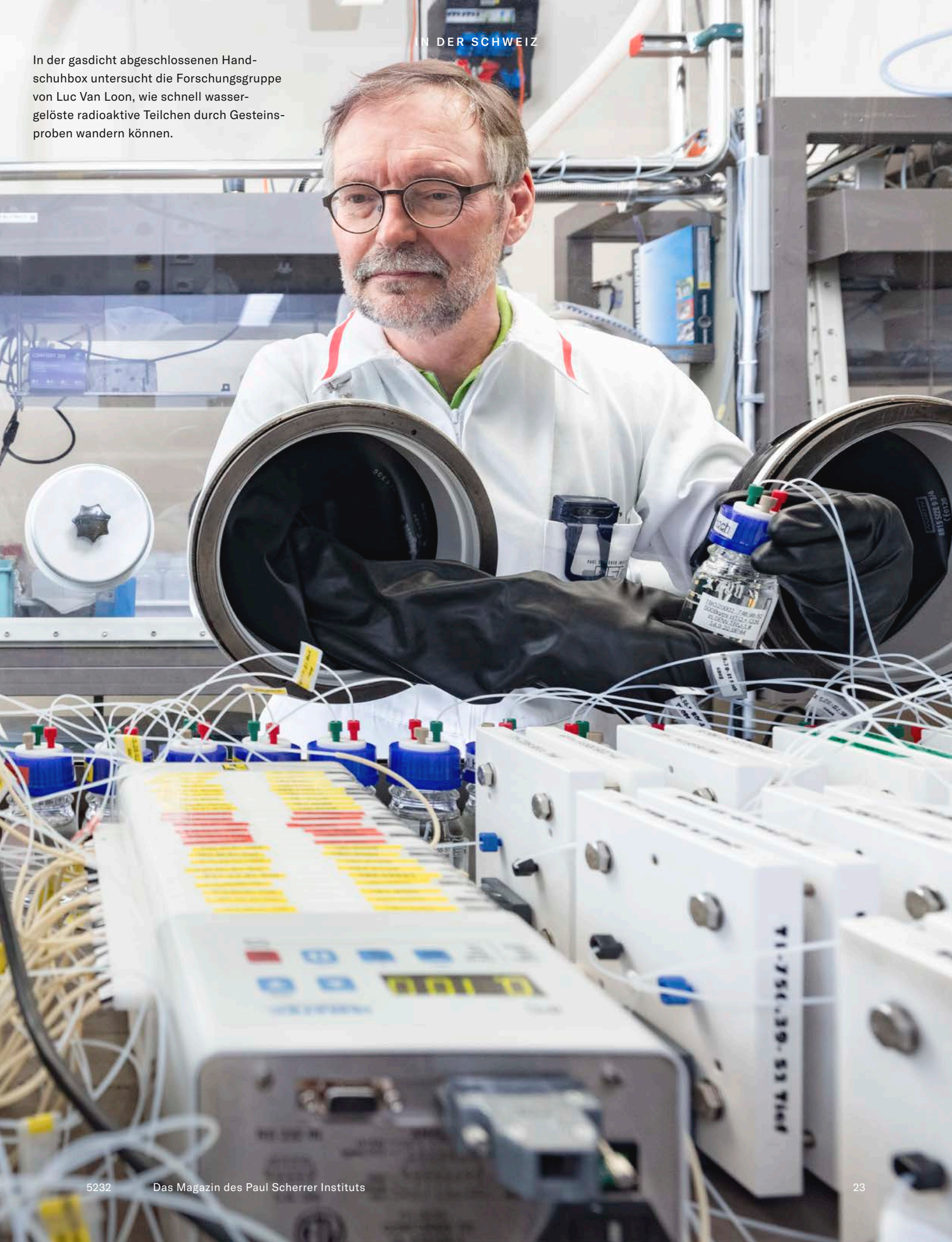
# Für eine Million Jahre sicher verwahrt

Die Schweiz plant, bis zum Jahr 2050 ein Tiefenlager für ihre radioaktiven Abfälle zu errichten. Drei Standorte kommen momentan infrage. Forschende am PSI helfen dabei, herauszufinden, welcher am geeignetsten ist.

Text: Brigitte Osterath



In der gasdicht abgeschlossenen Handschuhbox untersucht die Forschungsgruppe von Luc Van Loon, wie schnell wasser-gelöste radioaktive Teilchen durch Gesteinsproben wandern können.



Maria Marques fährt mit beiden Händen in ein Paar schwarze Gummihandschuhe. Durch zwei Durchführungen steckt die Geochemikerin ihre Arme in den gasdicht abgeschlossenen Arbeitsplatz, mit dem die Handschuhe verbunden sind. In dieser sogenannten Handschuhbox kann sie jetzt ihre Gesteinsproben untersuchen, ohne dass diese mit der Umgebungsluft in Kontakt kommen. «Dabei könnten sich die Proben möglicherweise verändern – und das wollen wir in jedem Fall verhindern.»

Die Proben, die das Team um Maria Marques am PSI-Forschungsbereich für Nukleare Energie und Sicherheit derzeit untersucht, stammen aus der Tiefbohrung Trüllikon-1, etwa 30 Kilometer nordöstlich von Zürich. Trüllikon liegt in einer der drei Standortregionen, die der Bund als potenziell geeignet für ein geologisches Tiefenlager ansieht, neben Jura Ost bei Brugg und Nördlich Lägern nordwestlich von Zürich. Von August 2019 bis April 2020 hat die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) dort Bohrkerne bis zu einer Tiefe von 1300 Meter entnommen. Besonders interessiert der Opalinuston, eine Schicht in mehreren hundert Meter Tiefe. Aber auch die Rahmengesteine, die darüber und darunter liegen, unterziehen die Forschenden einer eingehenden Prüfung.

Maria Marques nimmt ein flüssigkeitsgefülltes Plastikröhrchen zur Hand: Als Bodensatz hat sich darin ein dunkelgrauer Feststoff abgesetzt. «Das ist Opalinuston», erklärt die Forscherin. Sie gibt eine weitere farblose Flüssigkeit hinzu – eine stark verdünnte Lösung von radioaktivem Nickel – und stellt das Röhrchen in einen Schüttler. «Wir wollen wissen, wie gut der Ton radioaktive Teilchen bindet. Je stärker der Ton die Teilchen festhält, desto besser ist er als Wirtsgestein für ein Tiefenlager geeignet.» Zusammen mit anderen Proben wird die Suspension nun drei Tage lang ständig durchmischt.

### **Ehemaliger Meeresboden**

Opalinuston entstand vor 173 Millionen Jahren, als ein flaches Meer die Nordschweiz und die angrenzenden Länder bedeckte. Feiner Tonschlamm setzte sich am Meeresboden ab, verfestigte sich und bildete eine etwa 100 Meter dicke Schicht. In zahlreichen Untersuchungen hat sich Opalinuston als das bestmögliche Gestein herausgestellt, um radioaktive Abfälle zu verwahren.

In Kernkraftwerken entstehen im Betrieb Radionuklide – das sind Teilchen, die radioaktiv sind und so lange von Mensch und Umwelt ferngehalten werden müssen, bis sie grösstenteils zerfallen sind. Das kann bis zu einer Million Jahre dauern. Die Stahlbehälter, in denen die Abfälle eingeschlossen sind, bieten dabei nur relativ kurzen Schutz, erklärt Sergey Churakov, Leiter des PSI-Labors für

## **«Bis jetzt passt alles gut zusammen.»**

Luc Van Loon, PSI-Gruppenleiter am Forschungsbereich Nukleare Energie und Sicherheit

Endlagersicherheit. «Man erwartet, dass sie nach etwa 10 000 Jahren durchgerostet sind.» Dann könnten die Radionuklide in Kontakt kommen mit Wasser, das im Gestein vorhanden ist, und langsam durch den Erdboden diffundieren. Opalinuston soll als natürliche Barriere diese Wanderung verhindern.

Opalinuston besteht aus mikroskopisch kleinen Plättchen, die tausendmal dünner sind als ein menschliches Haar. Aufgrund seiner molekularen Struktur heften sich Radionuklide bereitwillig an seine Oberfläche oder gehen chemische Bindungen ein. «Opalinuston wirkt auf sie wie eine Art Magnet», sagt Churakov. Zudem lässt das Gestein kaum Wasser durch.

### **Je mehr Ton, desto besser**

Die Standortsuche regelt der «Sachplan geologische Tiefenlager». Derzeit befindet sich die Schweiz in der dritten Etappe, in der mithilfe von Tiefbohrungen evaluiert wird, welcher der drei Standortkandidaten am besten geeignet ist. Andreas Pautz, Professor für Kerntechnik und Leiter des PSI-Forschungsbereichs Nukleare Energie und Sicherheit, ist optimistisch: «Wir haben in der Schweiz mit dem Opalinuston geeignetes Wirtsgestein. Technologisch ist ein Tiefenlager also machbar und damit eine extrem sichere Angelegenheit.»

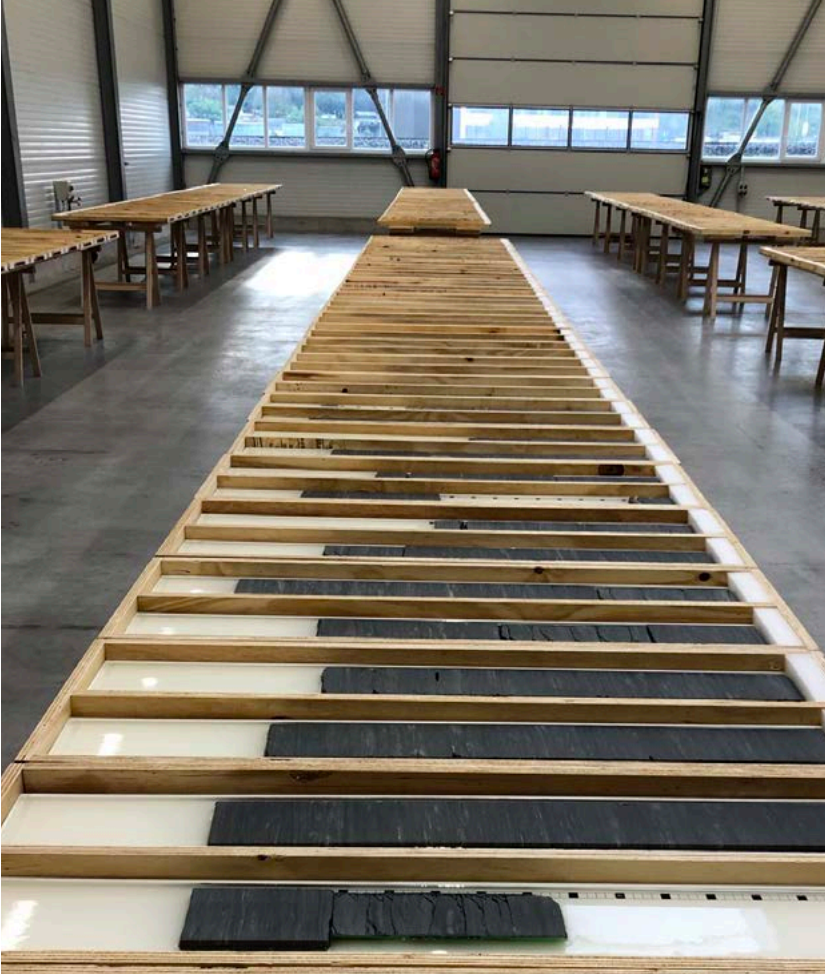
Es liegt nun an den Forschenden, das Gestein an den drei Standorten intensiv auf Zusammensetzung, Eigenschaften und damit Eignung unter die Lupe zu nehmen. Mineralogen von der Universität Bern untersuchen die Bohrkerne auf ihre Zusammensetzung und schicken Proben luftdicht eingeschweisst für weitere Messungen ans PSI.

### **Stühle zählen**

Nachdem ihre Probensuspensionen drei Tage lang durchmischt wurden, lässt Maria Marques die Plastikröhrchen in einer Zentrifuge so schnell rotieren, dass sich sämtlicher Feststoff am Boden absetzt. Dann ermitteln die Forschenden die radioaktive Aktivität der Lösungen, sprich: wie viele Atome pro Sekunde zerfallen.

Je stärker die Tonprobe Radionuklide bindet, desto weniger Radioaktivität lässt sich in der Lösung





Mit Bohrkernen (links) erschliesst die Nagra das Erdreich bis in 1500 Meter Tiefe und erkundet damit seine Beschaffenheit. Unter anderem können dabei Einschlüsse zu Tage treten (rechts).

feststellen. Aus dem Unterschied des Wertes vor und nach den drei Tagen berechnen die Forschenden die Adsorptionsfähigkeit des Gesteins. «Angenommen, die Radionuklide sind Besucher in einem Konzertsaal», erklärt Maria Marques. «Dann zählen wir, wie viele Stühle im Raum stehen, auf die sich die Besucher setzen können.» Alle Sitzenden entsprechen den radioaktiven Teilchen, die im Ton gebunden wurden. Wer keinen Sitzplatz bekommt, bleibt in der Analogie in der Flüssigkeit zurück.

#### Auf den Durchbruch warten

Eine andere Gruppe am PSI misst, wie schnell sich Radionuklide im Wasser durch das Gestein hindurchbewegen können. Das sollte in einem Tiefenlager möglichst langsam geschehen. Für die Versuche schickt die Universität Bern an den Mantelflächen mit Harz versiegelte Bohrkernscheiben nach Villigen.

Der Ingenieur Luc Van Loon, Leiter der PSI-Forschungsgruppe für Diffusionsprozesse, spannt eine solche dunkelgraue Scheibe zwischen zwei Platten ein, ähnlich einem Schraubstock. Sowohl links als auch rechts laufen Schläuche ab; darüber wird die Bohrkernscheibe ständig mit Flüssigkeit umspült – links mit einer Lösung mit Radionukliden, rechts mit der gleichen Lösung ohne.

Alle paar Tage nehmen Mitarbeitende Proben, um zu bestimmen, wie lange es dauert, bis die

Radionuklide die Scheibe durchdrungen haben – «wir nennen das den Durchbruch», sagt Luc Van Loon. Das Experiment kann gut drei Monate dauern.

#### Realität versus Computermodell

Genauso wichtig wie Messdaten aus Laboruntersuchungen sind Computermodelle, welche die Vorgänge im Tiefenlager über einen langen Zeitraum simulieren. «Wir reden hier immerhin über eine Million Jahre», erklärt Sergey Churakov. Das lässt sich im Labor nicht nachstellen.

PSI-Forschende arbeiten seit über 20 Jahren daran, die Adsorption und Diffusion von Wasser und Radionukliden in Opalinuston im Computer zu simulieren. Daten aus Messungen an der PSI-Grossforschungsanlage Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS unterfüttern das Modell mit Detailinformationen, etwa: Wo genau lagern sich die Radionuklide im Ton an?

Daten aus ihren Laborexperimenten gleichen die Forschenden immer wieder mit denen aus ihren Simulationen ab sowie mit Resultaten aus Feldversuchen in Felslaboren. «Die Ergebnisse aus Experimenten und Simulationen müssen zusammenpassen», erklärt Luc Van Loon, «und bis jetzt passt alles gut zusammen.» Bis Ende 2029 sollen laut dem «Sachplan geologische Tiefenlager» ein oder mehrere endgültige Standorte für den radioaktiven Abfall der Schweiz ausgewählt sein. ♦

# Aktuelles aus der PSI-Forschung

## 1 Das kalte Gedächtnis der Erde

Forschende des Labors für Umweltchemie am PSI unternahmen im September 2020 eine Expedition auf den Gletscher des Grand Combin im Schweizer Kanton Wallis. Mit Kollegen aus Italien wollten sie dort auf 4100 Metern Höhe Eisbohrkerne für das internationale «Ice Memory»-Projekt ziehen. Dieses sieht vor, solche Bohrproben von Gletschern weltweit einzusammeln und in einer künstlich angelegten Eishöhle der zuverlässig kalten Zentralantarktis einzulagern. Wegen der fortgeschrittenen Gletscherschmelze mussten die Forschenden ihre Unternehmung jedoch abbrechen. Auch das eine wichtige Erkenntnis: Eventuell sind die meisten Gletscher der Alpen bereits zu sehr von der Schmelze betroffen, um noch geeignete Proben für «Ice Memory» zu liefern. Derzeit laufen am PSI die Tests, ob wenigstens die 17 Meter langen Eisbohrkerne, die während der Expedition noch gewonnen wurden, valide Daten liefern können.

Weitere Informationen:  
<http://psi.ch/de/node/41341>

Etwa **80** Meter tief sollten die Bohrungen reichen

Bis zu **10 000** Jahre Klimageschichte hätte man damit überblicken können

Im Schnitt herrschen **-54 °C** dort, wo das Eisarchiv in der Antarktis entstehen soll

## 2 Medikamente gegen Covid-19

Wie müssen Wirkstoffe aufgebaut sein, die das Coronavirus SARS-CoV-2 lahmlegen? Dieser Frage gehen PSI-Forschernde in Kooperation mit Forschungsgruppen weltweit nach. Mit einer noch recht jungen Methode prüfen sie, ob Molekülfragmente an wichtige Proteine des Coronavirus binden. Diese Fragmente sind für vielversprechende Wirkstoffe typisch, aber viel kleiner als die eigentlichen Verbindungen, die später einmal als Wirkstoff auf den Markt kommen könnten. Die Forschenden lassen eine Lösung von Fragmenten auf Proteinkristalle einwirken und durchleuchten die Kristalle anschliessend an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. So können sie nicht nur ermitteln, welche Fragmente an das Protein gebunden haben, sondern auch wie. Aus den vielen Einzelinformationen erhoffen sie sich eine Antwort darauf, wie ein wirkungsvolles Medikament aussehen kann.

Weitere Informationen:  
<http://www.psi.ch/de/node/37261>

## 3 Ultraschnelle Tumorthherapie

Erstmals haben Forschende am Zentrum für Protonentherapie des Paul Scherrer Instituts PSI in der Schweiz eine ultraschnelle, hoch dosierte Bestrahlung mit Protonen getestet. Dieses neue, experimentelle FLASH-Verfahren könnte die Strahlentherapie von Krebs revolutionieren und Patienten viele Wochen der Behandlung ersparen. Bei FLASH wird eine etwa hundertmal höhere Strahlendosis pro Sekunde gegenüber den sonst üblichen Behandlungen eingesetzt. Das zerstört Tumorzellen sehr effektiv. Allerdings müssen die Forschenden noch abklären, ob bei dem Verfahren gesundes Körpergewebe geschädigt wird. Bislang haben die Forschenden zwei Serien von Experimenten mit der FLASH-Technik am PSI an bis zu 24 Stunden alten Zebrafisch-Embryonen durchgeführt. Am Centre hospitalier universitaire vaudois in Lausanne werden anschliessend die Auswirkungen der Bestrahlung auf die Zellen untersucht. Ein neues Kapitel in der Entwicklung der Protonentherapie kündigt sich an.

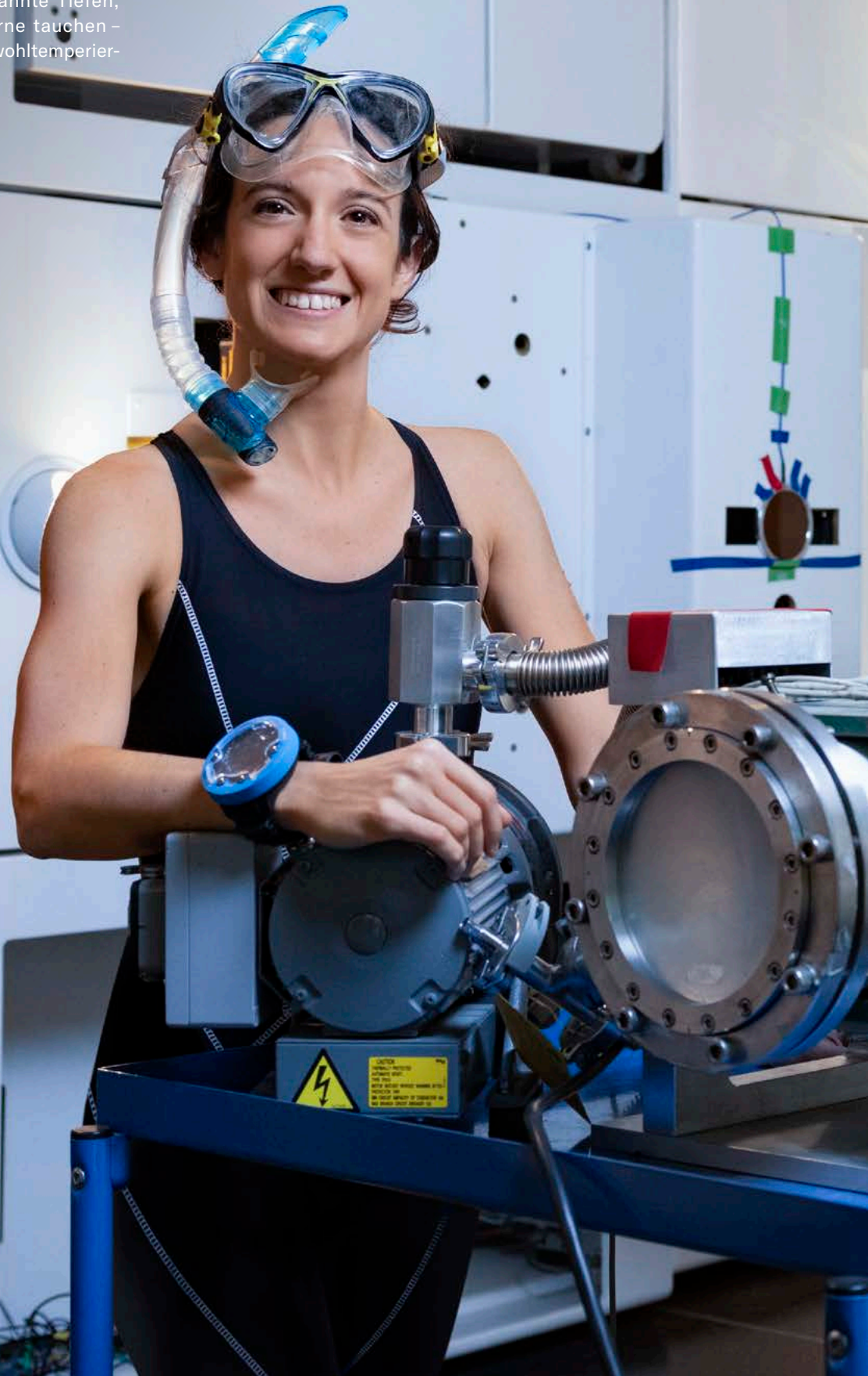
Weitere Informationen:  
<http://psi.ch/de/node/39583>

## 4 Steuerbare Nanowirbel

Um zukünftig grössere Datenmengen auf noch kleinerem Raum zu speichern oder sie effizienter zu verarbeiten, interessieren sich Forschende für möglichst kleine magnetische Strukturen, die in Materialien vorkommen können. Eine Art Struktur nennt sich Skyrmionen. Diese sind Nanowirbel der Spins eines Materials. Spins wiederum kann man sich wie winzige Stabmagnete vorstellen; sie repräsentieren den Magnetismus auf der Ebene der Atome. Bisher waren nur Skyrmionen in ferromagnetischen Materialien bekannt. Forschende am PSI haben nun erstmals auch antiferromagnetische Skyrmionen erschaffen und sie an der Spallations-Neutronenquelle SINQ mittels Neutronenstreuung nachgewiesen. Antiferromagnetisch bedeutet, dass benachbarte Spins antiparallel ausgerichtet sind, also einer nach oben und der nächste nach unten zeigt. Und was zunächst eine Eigenschaft des Materials war, sahen die PSI-Forschenden dann auch innerhalb der einzelnen Skyrmionen: In diesen Wirbeln waren entscheidende Bausteine gegenläufig zueinander ausgerichtet. Ein grosser Vorteil von antiferromagnetischen Skyrmionen ist, dass sie sich viel simpler steuern lassen als ihre ferromagnetischen Kollegen: Legt man einen Strom an, bewegen sich antiferromagnetische Skyrmionen geradlinig. Ihre Entdeckung ist daher ein wichtiger Schritt in Richtung potenzieller Anwendungen, zum Beispiel für effizientere Computer.

Weitere Informationen:  
<http://psi.ch/de/node/39430>

Tief im Inneren von Tumorzellen entfalten die Protonen, die am Zentrum für Protonentherapie zur Behandlung von Tumorpatientinnen und -patienten eingesetzt werden, ihre Wirkung. Serena Psoroulas, hier im ehemaligen Behandlungsraum Gantry 1, erforscht, wie diese Behandlung mit neuen Verfahren noch besser werden kann. In ihrer Freizeit ergründet sie auch gerne ihr unbekannte Tiefen, denn sie geht leidenschaftlich gerne tauchen – oder schnorcheln. Vorzugsweise in wohltemperierten Gefilden am Mittelmeer.



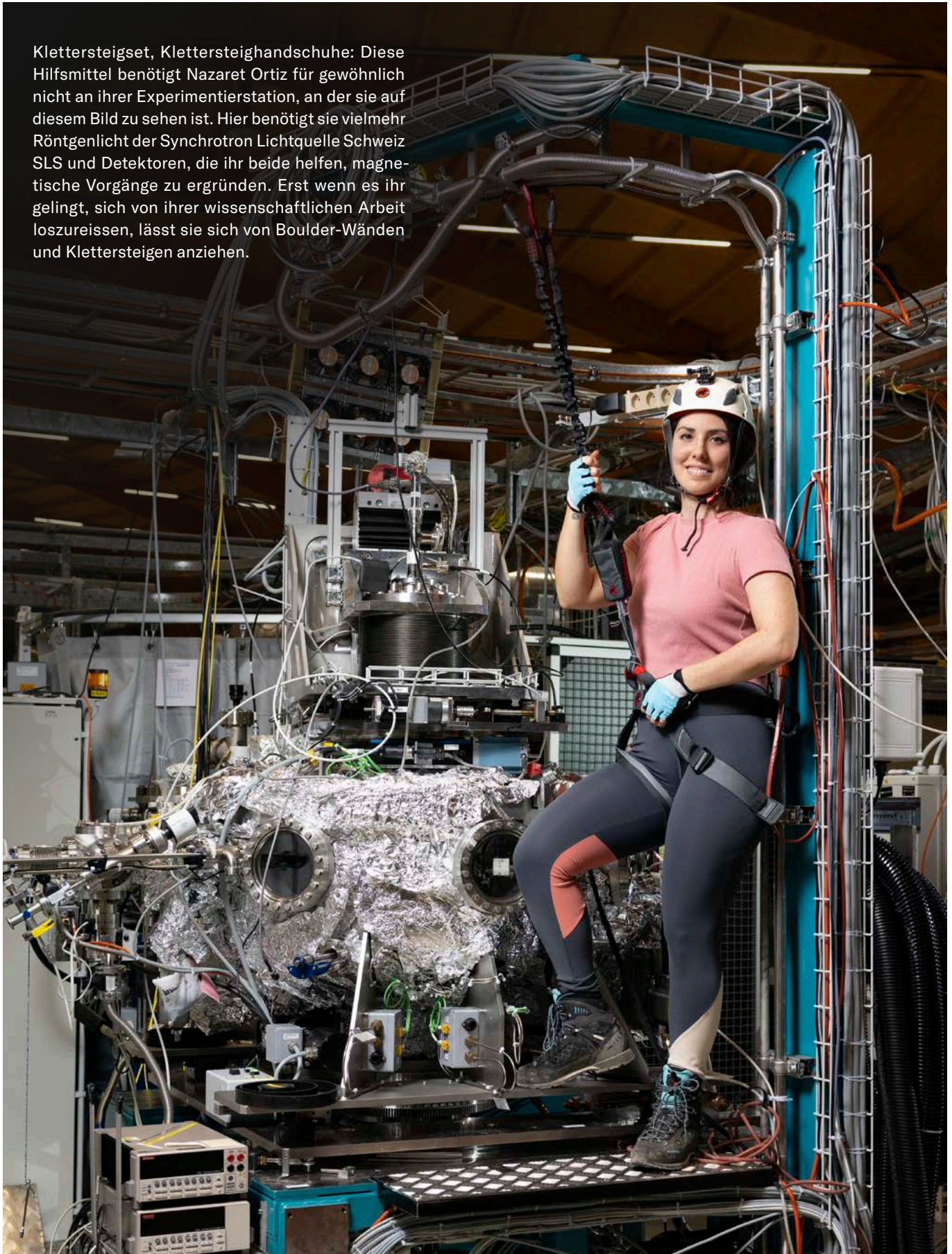
# Sportliche Forschende

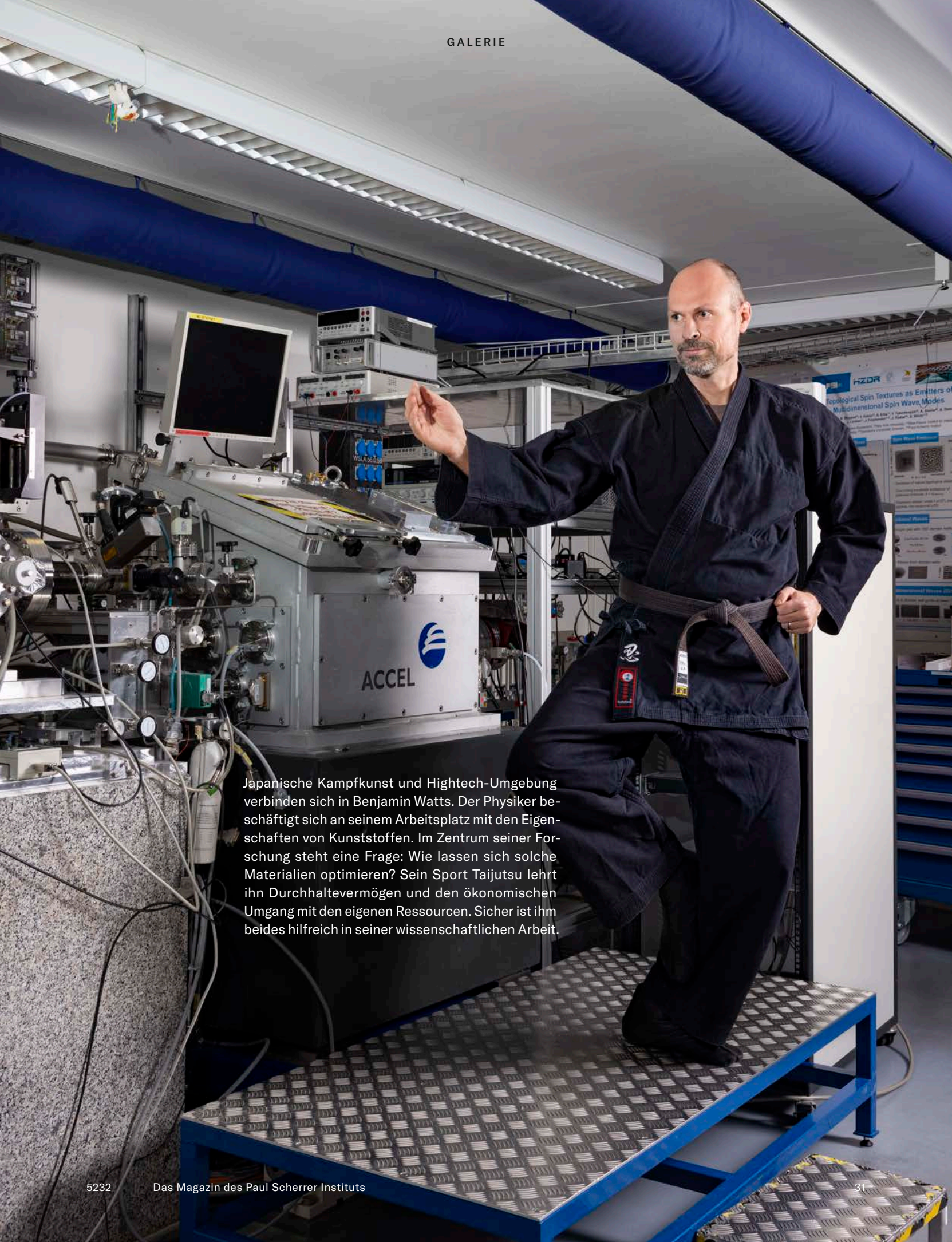
Für Wissenschaft und Forschung benötigt man auf jeden Fall Ausdauer, Mut, Kampfgeist und vor allem Neugier. Eigenschaften, die sich auch im Sport bewähren – gleichgültig ob man im Wettkampf antritt oder sich nur für Gesundheit und Wohlbefinden sportlich betätigt. Deshalb waren auch wir neugierig und haben die Forschenden am PSI gefragt: Welchen Sport betreiben Sie in Ihrer Freizeit? Dabei erhielten wir teilweise überraschende Antworten. Sehen Sie selbst.

Text: Christian Heid

GALERIE

Klettersteigset, Klettersteighandschuhe: Diese Hilfsmittel benötigt Nazaret Ortiz für gewöhnlich nicht an ihrer Experimentierstation, an der sie auf diesem Bild zu sehen ist. Hier benötigt sie vielmehr Röntgenlicht der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS und Detektoren, die ihr beide helfen, magnetische Vorgänge zu ergründen. Erst wenn es ihr gelingt, sich von ihrer wissenschaftlichen Arbeit loszureissen, lässt sie sich von Boulder-Wänden und Klettersteigen anziehen.





Japanische Kampfkunst und Hightech-Umgebung verbinden sich in Benjamin Watts. Der Physiker beschäftigt sich an seinem Arbeitsplatz mit den Eigenschaften von Kunststoffen. Im Zentrum seiner Forschung steht eine Frage: Wie lassen sich solche Materialien optimieren? Sein Sport Taijutsu lehrt ihn Durchhaltevermögen und den ökonomischen Umgang mit den eigenen Ressourcen. Sicher ist ihm beides hilfreich in seiner wissenschaftlichen Arbeit.

Sehr leicht fällt es Benedikt Hermann, hochkomplexe Zusammenhänge darzustellen, insbesondere wenn es sich um sein Fachgebiet handelt, die Beschleunigertechnologie. Er arbeitet an einer neuen Technik, die es erlaubt, mit einem neuen Instrument die letzten Tiefen der Welt zu ergründen. Tiefe Täler entdeckt er auch gerne bei seinem Sport: Schon von so manchem Alpengipfel ist er in seiner Freizeit mit dem eignen Gleitschirm entspannt ins Tal geschwebt, bis zur Punktlandung.







Tigran Rostomyan behält sein Ziel unablässig im Blick: Mit Elektronen und Myonen will er den Protonenradius exakter bestimmen als alle Forschenden vor ihm. Für seine wissenschaftliche Arbeit benötigt er Konzentration und Ausdauer. Qualitäten, die er als Boxer und belgischer Champion im Superschwergewicht nachweislich mitbringt.



# Mit Sprachen und Struktur zur Lösung

Vor zehn Jahren kam Carolina Arboleda Clavijo in die Schweiz. Am PSI leistete sie mit ihren Forschungen einen wichtigen Beitrag zur Brustkrebsfrüherkennung. Heute hält sie in ganz Europa für das Unternehmen Mathworks in fünf Sprachen Schulungen für die Software MATLAB.

Text: Christina Bonanati

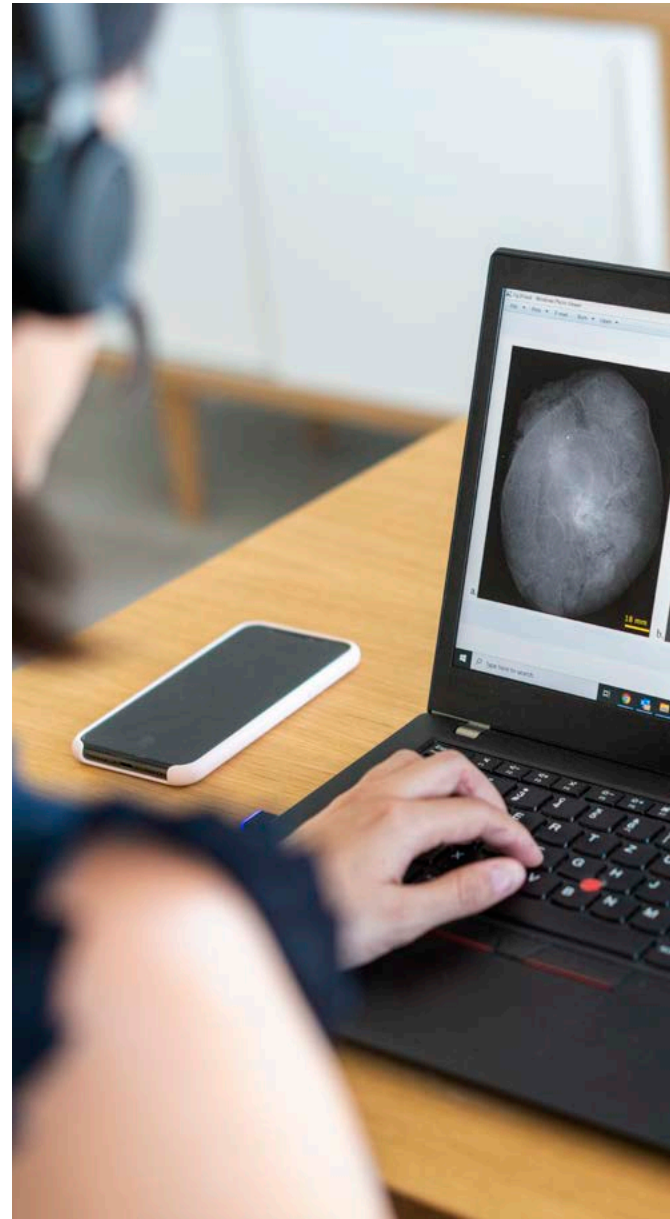
So vielfältig und aufregend ihre Karriere auch war, Struktur in ihrer Arbeit hat die Kolumbianerin immer wertgeschätzt. Auch in ihrer Attikawohnung in Olten sind klare Linien zu erkennen. Dort wohnt Carolina Arboleda Clavijo mit ihrem Lebensgefährten und Landsmann, einem ehemaligen PSI-Kollegen. Puristisch und ordentlich wirken die Wohnräume, die derzeit auch ihre Büros sind. Ihre Konzentration richtet die 33-Jährige auf das, was hinter dem Bildschirm ihres Laptops stattfindet: Lösungen für mathematische Aufgaben. Noch im letzten Jahr reiste sie quer durch Europa, um Kurse für die Software MATLAB zu geben. Seit der SARS-CoV-2-Pandemie unterrichtet sie online. Auch in ihrem Büro von Mathworks in Bern war sie seitdem selten.

## Keine Angst zu fragen

Seinerzeit in Kolumbien begann Arboleda 2004 ihr Studium der biomedizinischen Technologien. «Ich finde es superspannend, in den Körper zu schauen», schwärmt sie mit einem breiten Lächeln. Im neunten Semester stand dann ein Praktikum an. Sie schrieb massenhaft E-Mails an Professoren in den USA, die zum Thema Medical Imaging forschten. Antwort bekam sie nur von Norbert Pelc, damals Professor für Radiologie an der Stanford University. «Norbert hat mir bewiesen, dass es möglich ist, sich in beiden Welten zu bewegen, Industrie und Forschung, und trotzdem darin gut zu sein. Von ihm habe ich gelernt, strukturiert zu arbeiten», erinnert

sich Arboleda an ihre Zeit in Kalifornien, wo sie an einer Methode forschte, um mittels Röntgentomografie die Grösse von Arterienverkalkungen besser zu ermitteln. Zurück in Kolumbien entwickelte sie mit Studienkollegen für ihre Diplomarbeit eine Computer-Hirn-Schnittstelle, um Menschen, die aufgrund einer Behinderung keine Tastatur bedienen können, digitales Schreiben zu ermöglichen.

Für ihr Masterstudium wurde der damals 22-Jährigen dann die ETH Zürich empfohlen. Sie wollte Europa kennenlernen und wissen, wie es ist, dort länger zu leben. Doch schon die Gebühren für ihr Diplomstudium an einer privaten Universität hatten ihre Eltern an die Grenze ihrer finanziellen Möglichkeiten gebracht. Um sich etwas Geld und Zeit zu verschaffen, ging sie für ein Jahr nach Chile. Dort entwarf sie einen kostengünstigen, auf Glasfaseroptik basierenden Reaktionsknopf, mit dem experimentell mittels Magnetresonanztomografie Veränderungen des Gehirns von Kindern mit Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung (ADHS) charakterisiert wurden. Obwohl Arboleda dachte, dass ihre Chancen schlecht stünden, erhielt sie dann doch ein Bundesstipendium der Schweiz und zügelte nach Zürich. Als sie bei Marco Stampanoni eine Prüfung ablegte, wurde er auf die junge Frau aufmerksam und bot ihr eine Masterarbeit in seiner Arbeitsgruppe, dem Labor für Makromoleküle und Bioimaging, am PSI an. Dort waren sie dabei, ein neues Verfahren zur Früherkennung von Brustkrebs zu verbessern. «Gutartige und bösartige



«Es ist möglich, sich in Industrie und Forschung zu bewegen und in beiden Welten gut zu sein.»

Carolina Arboleda Clavijo, Senior Training Engineer, Mathworks

Mikroverkalkungen könnten sich darin unterscheiden, wie sie Röntgenlicht streuen. Das macht sich die Röntgenphasenkontrast-Mammografie zunutze», erklärt Arboleda. Ihre Aufgabe war es, die drei daraus entstehenden, unterschiedlichen Bilder mathematisch zu kombinieren und deren Rauschen zu vermindern.

Zurück in Chile für einen weiteren einjährigen Job spielte Arboleda mit dem Gedanken, noch Medizin zu studieren. Als sie Stampanoni um ein Referenzschreiben bat, hatte dieser allerdings schon andere Pläne für sie: «Die Idee war, die Gitterinterferometrie in ein konventionelles Mammografiegerät des Herstellers Phillips einzubauen, sodass man damit die neue Methode nutzen kann.» Um die richtigen Parameter für die dabei verwendeten hauchdünnen Silizium- und Goldgitter zu finden, simulierte Arboleda für ihre Doktorarbeit das Verhalten der Röntgenwellen mithilfe der Software MATLAB und testete die entworfene Apparatur mit Brustgewebeproben. Das Gerät auch praktisch am Spital anzuwenden, motivierte sie dann, als Postdoktorandin weiter zu forschen: «Ich fand es spannend, den Prozess kennenzulernen, ein neuartiges Gerät an Menschen zu testen. Die ethischen Abwägungen dabei waren für mich eine ganz neue Erfahrung.»

### Sprachen als Türöffner

Doch nach fast sechs Jahren am PSI wollte Carolina Arboleda Clavijo auch die Welt der Wirtschaft kennenlernen: «Meine Philosophie war immer: Ich kann nicht sagen, dass mir etwas nicht gefällt, wenn ich es nicht ausprobiert habe.»

Anfang 2019 bekam sie die Stelle als Senior Training Engineer bei Mathworks angeboten. «Anderen etwas beizubringen bereitet mir große Freude», das entspricht Arboleda mit ihrer lauten Stimme und der offenen, herzlichen Art. Seither erklärt sie Mitarbeitenden von Firmen aus ganz Europa, wie sie in Bereichen wie zum Beispiel «Deep Learning» und «Machine Learning» die Mathematik-Software MATLAB anwenden können. Sie selbst hatte dieses Tool in ihrer Forschung schon seit zwölf Jahren genutzt. Trotzdem konnte sie noch einiges dazulernen. Auch ihre Sprachkenntnisse haben ihr zu der neuen Stelle verholpen. Sprachen lernen habe sie schon immer gemocht. Schon in der Kindheit sei sie samstags regelmässig damit beschäftigt gewesen. Mit acht Jahren lernte sie Englisch, später kam dann Französisch hinzu, schliesslich noch Italienisch – auch wenn ihr Vater das als nutzlos betrachtete. «Ich hatte nie Angst zu sprechen. Für mich ist

es okay, dabei auch Fehler zu machen», so Arboleda Philosophie, die ihr auch beim Erlernen der deutschen Sprache half.

Ob sie die Forschung vermisse? «Mathworks ist eine sehr akademische Firma und ich bin in der akademischen Abteilung», sagt sie. Auch wenn sie nun in der Wirtschaft sei, fühle es sich manchmal noch so an wie in der Forschung. Etwa als sie Anwendungsbeispiele für einen neuen Onlinekurs finden musste, bei dem sich Kunden in selbstbestimmtem Tempo im Bereich der Bildverarbeitung weiterbilden. «Die technischen Aufgaben genieße ich schon mehr, aber auch das Marketing, die psychologischen Aspekte und den Kundenkontakt finde ich interessant.» Arboleda bevorzugt zudem das schnelle, dynamische Arbeitsumfeld bei ihrer neuen Stelle: «In der akademischen Welt ist alles sehr langsam, es wird gemacht und probiert, aber es dauert, bis ein Ergebnis vorliegt. In der Wirtschaft ist das anders, da muss etwas zu einem bestimmten Zeitpunkt fertig sein.» Auch sei im kleinen Büro in Bern zwar nicht so viel los wie am PSI mit den Grossforschungsanlagen und wo man in der Pause in den Wald oder zum Yoga gehen konnte. Aber sie finde es spannend, mit Menschen aus unterschiedlichen Kulturen zu kommunizieren und seltsam klingende Orte zu besuchen. Arboleda ist sehr glücklich über ihre aktuelle Situation. Dahin verholpen haben ihr sicherlich ihre vielen Interessen, ihre Eigeninitiative und ihr Mut. Sie lacht: «Das habe ich von meiner Mutter gelernt, sie hatte nie Angst zu fragen. Ihre Lebensphilosophie ist: Du fragst einfach und wenn die Leute «Nein» sagen, ist das auch in Ordnung.» ♦

WIR ÜBER UNS

Im Aargau zu Hause  
forschen wir für die Schweiz  
in weltweiter Zusammenarbeit.





5232 ist die Adresse für Forschung an Grossforschungsanlagen in der Schweiz. Denn das Paul Scherrer Institut PSI hat eine eigene Postleitzahl. Nicht unge-rechtfertigt, finden wir, bei einem Insti-tut, das sich über 342000 Quadratmeter erstreckt, eine eigene Brücke über die Aare besitzt und mit 2100 Beschäftigten mehr Mitarbeitende hat, als so manches Dorf in der Umgebung Einwohner.

Das PSI liegt im Kanton Aargau auf beiden Seiten der Aare zwischen den Gemeinden Villigen und Würenlingen. Es ist ein Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften des Bun-des und gehört zum Eidgenössischen Technischen Hochschul-Bereich (ETH-Bereich), dem auch die ETH Zürich und die ETH Lausanne angehören sowie die Forschungsinstitute Eawag, Empa und WSL. Wir betreiben Grundlagen- und angewandte Forschung und arbeiten so an nachhaltigen Lösungen für zentrale Fragen aus Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft.

#### **Komplexe Grossforschungsanlagen**

Von der Schweizerischen Eidgenossen-schaft haben wir den Auftrag erhalten, komplexe Grossforschungsanlagen zu entwickeln, zu bauen und zu betreiben. Unsere Anlagen sind in der Schweiz ein-zigartig, manche Geräte gibt es auch weltweit nur am PSI.

Zahlreiche Forschende, die auf den un-terschiedlichsten Fachgebieten arbeiten, können durch Experimente an solchen Grossforschungsanlagen wesentliche Erkenntnisse für ihre Arbeit gewinnen. Gleichzeitig sind Bau und Betrieb derar-tiger Anlagen mit einem so grossen Auf-wand verbunden, dass Forschergruppen an den Hochschulen und in der Industrie an der eigenen Einrichtung solche Mess-geräte nicht vorfinden werden. Deshalb stehen unsere Anlagen allen Forschenden offen.

Um Messzeit für Experimente zu er-halten, müssen sich die Forschenden aus dem In- und Ausland jedoch beim PSI bewerben. Mit Experten aus aller Welt besetzte Auswahlkomitees bewerten diese Anträge auf ihre wissenschaft-liche Qualität hin und empfehlen dem PSI, wer tatsächlich Messzeit bekom-men soll. Denn obwohl es rund 40 Mess-plätze gibt, an denen gleichzeitig Ex-perimente durchgeführt werden können, reicht die Zeit nie für alle eingegan-genen Bewerbungen. Rund die Hälfte bis zwei Drittel der Anträge muss abge-lehnt werden.

Etwa 1900 Experimente werden an den Grossforschungsanlagen des PSI jährlich durchgeführt. Die Messzeit ist am PSI für alle akademischen Forschenden kostenlos. Nutzer aus der Industrie können für ihre proprietäre Forschung in einem besonderen Verfahren Messzeit kaufen und die Anlagen des PSI für ihre

# 5

schweizweit einzigartige  
Grossforschungsanlagen

# 800

Fachartikel jährlich, die auf  
Experimenten an den  
Grossforschungsanlagen beruhen

# 5000

Besuche jährlich von Wissen-schaftlern aus der ganzen Welt, die an diesen Grossforschungs-anlagen Experimente durchführen

angewandte Forschung verwenden. Das PSI bietet dafür spezielle Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen an.

Insgesamt unterhält das PSI fünf Grossforschungsanlagen, an denen man in Materialien, Biomoleküle oder technische Geräte blicken kann, um die Vorgänge in deren Innerem zu erkunden. Dort «leuchten» die Forschenden bei ihren Experimenten mit unterschiedlichen Strahlen in die Proben, die sie untersuchen wollen. Dafür stehen Strahlen von Teilchen – Neutronen bzw. Myonen – oder intensivem Röntgenlicht – Synchrotronlicht bzw. Röntgenlaserlicht – zur Verfügung. Mit den verschiedenen Strahlenarten lässt sich am PSI eine grosse Vielfalt an Materialeigenschaften erforschen. Der grosse Aufwand hinter den Anlagen ergibt sich vor allem daraus, dass man grosse Beschleuniger braucht, um die verschiedenen Strahlen zu erzeugen.

### **Drei eigene Schwerpunkte**

Das PSI ist aber nicht nur Dienstleister für externe Forschende, sondern hat auch ein ehrgeiziges eigenes Forschungsprogramm. Die von PSI-Forschenden gewonnenen Erkenntnisse tragen dazu bei, dass wir die Welt um uns besser verstehen, und schaffen die Grundlagen für die Entwicklung neuartiger Geräte und medizinischer Behandlungsverfahren.

Gleichzeitig ist die eigene Forschung eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg des Nutzer-Programms an den Grossanlagen. Denn nur Forschende, die selbst an den aktuellen Entwicklungen der Wissenschaft beteiligt sind, können die externen Nutzer bei ihrer Arbeit unterstützen und die Anlagen so weiterentwickeln, dass diese auch in Zukunft den Bedürfnissen der aktuellen Forschung entsprechen.

Unsere eigene Forschung konzentriert sich auf drei Schwerpunkte. Im Schwerpunkt Materie und Material untersuchen wir den inneren Aufbau verschiedener Stoffe. Die Ergebnisse helfen, Vorgänge in der Natur besser zu verstehen und liefern die Grundlagen für neue Materialien in technischen und medizinischen Anwendungen.

Ziel der Arbeiten im Schwerpunkt Energie und Umwelt ist die Entwicklung neuer Technologien für eine nachhaltige

und sichere Energieversorgung sowie für eine saubere Umwelt.

Im Schwerpunkt Mensch und Gesundheit suchen Forschende nach den Ursachen von Krankheiten und nach möglichen Behandlungsmethoden. Im Rahmen der Grundlagenforschung klären sie allgemein Vorgänge in lebenden Organismen auf. Zudem betreiben wir in der Schweiz die einzige Anlage zur Behandlung von spezifischen Krebserkrankungen mit Protonen. Dieses besondere Verfahren macht es möglich, Tumore gezielt zu zerstören und dabei das umliegende Gewebe weitgehend unbeschädigt zu lassen.

### **Die Köpfe hinter den Maschinen**

Die Arbeit an den Grossforschungsanlagen des PSI ist anspruchsvoll. Unsere Forscherinnen, Ingenieure und Berufsleute sind hoch spezialisierte Experten. Uns ist es wichtig, dieses Wissen zu erhalten. Daher sollen unsere Mitarbeitenden ihr Wissen an junge Menschen weitergeben, die es dann in verschiedenen beruflichen Positionen – nicht nur am PSI – einsetzen. Deshalb sind etwa ein Viertel unserer Mitarbeitenden Lernende, Doktorierende oder Postdoktorierende.

## **IMPRESSUM**

**5232 – Das Magazin des Paul Scherrer Instituts**

Erscheint dreimal jährlich.  
Ausgabe 1/2021 (Januar 2021)  
ISSN 2504-2262

**Herausgeber**  
Paul Scherrer Institut  
Forschungsstrasse 111  
5232 Villigen PSI  
Telefon +41 56 310 21 11  
www.psi.ch

**Redaktionsteam**  
Dagmar Baroke, Monika Blétry,  
Monika Gimmel, Christian Heid,  
Dr. Laura Hennemann,  
Sebastian Jutzi (Ltg.),  
Dr. Brigitte Osterath

**Design und Art Direction**  
Studio HübnerBraun

**Fotos**  
Scanderbeg Sauer Photography, ausser:  
Seite 25: Nagra;  
Seiten 26/27: Adobe Stock;  
Seiten 34/36: Ruben Wyttenbach;  
Seite 38: Paul Scherrer Institut/  
Markus Fischer.

**Grafiken**  
illuteam, ausser:  
Seiten 6/7: Daniela Leitner;  
Seite 41: Paul Scherrer Institut/  
Claire Donnelly.

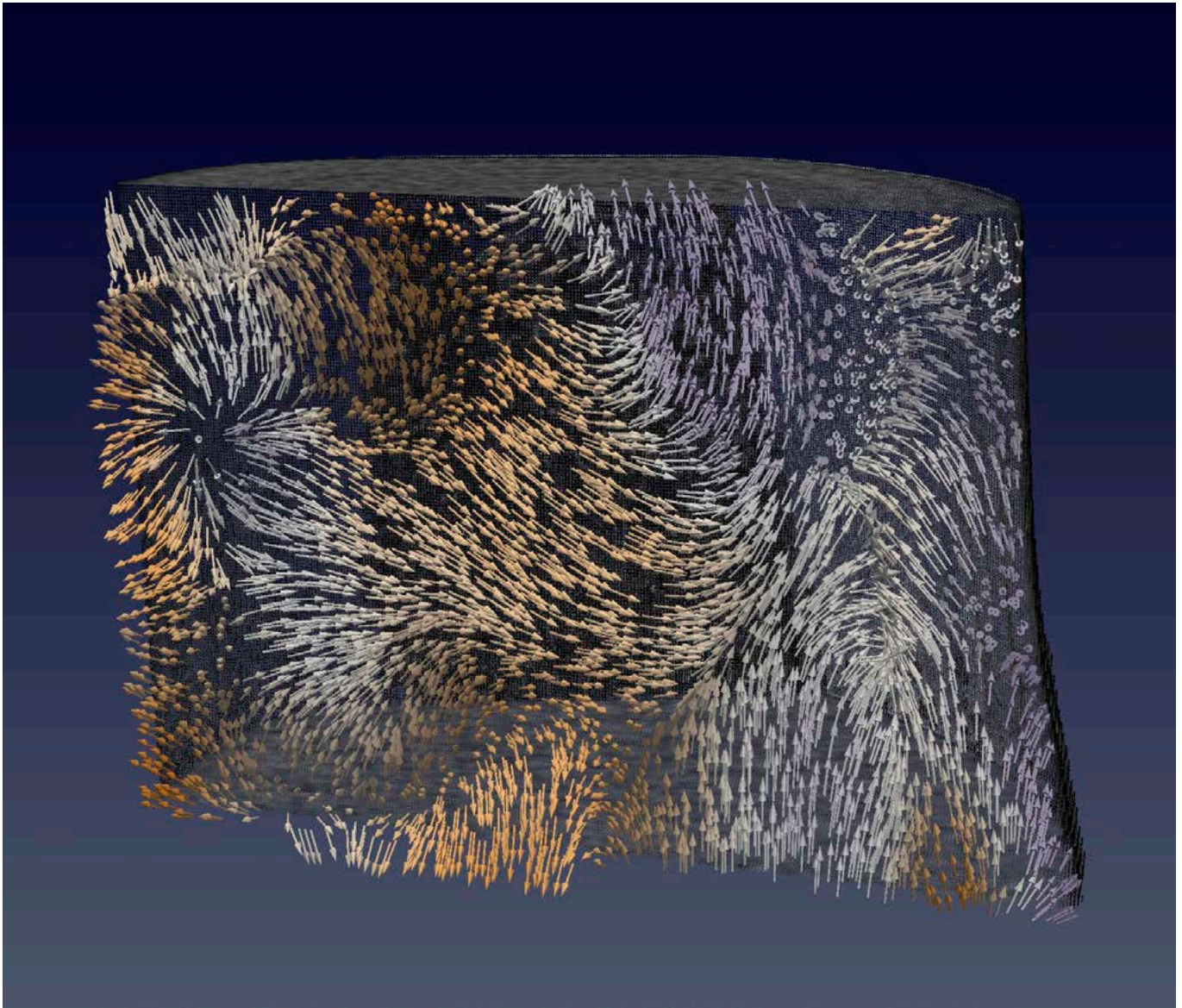
**Mehr über das PSI lesen Sie auf**  
www.psi.ch

**5232 steht im Internet zur Verfügung und kann kostenlos abonniert werden unter**  
www.psi.ch/de/5232

**5232 ist auch auf Französisch erhältlich**  
www.psi.ch/fr/5232

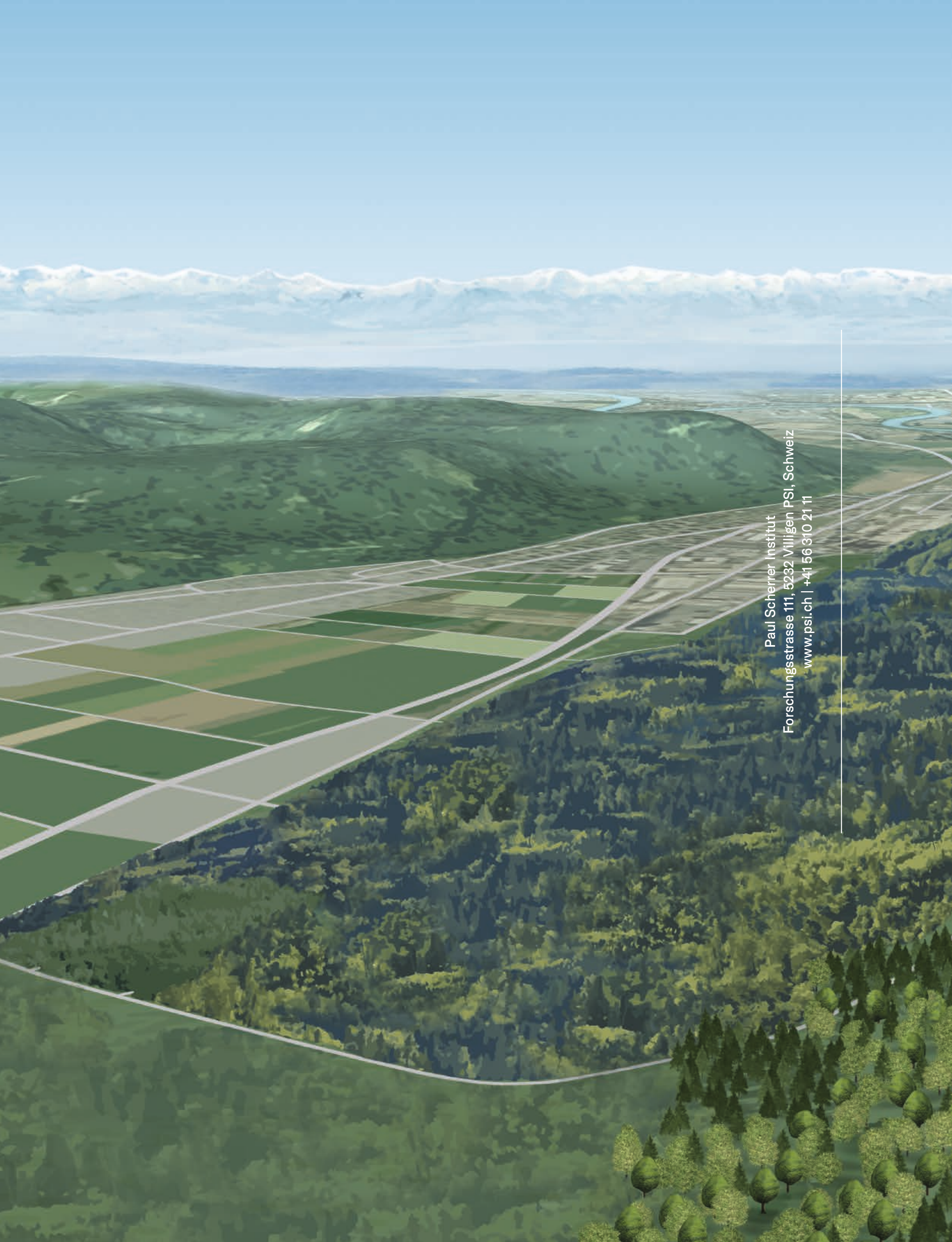






## Das erwartet Sie in der nächsten Ausgabe

Sie sind entscheidende Bauteile der Grossforschungsanlagen des PSI: Magnete. SLS, SwissFEL und Protonenbeschleuniger bringen mit ihrer Hilfe Teilchen wie Elektronen oder Protonen auf extrem hohe Geschwindigkeiten. Erst das ermöglicht den tiefen Blick in die Materie bis auf die Ebene von Atomen und hilft wiederum bei der Erforschung des Magnetismus. Um die beinahe magisch wirkende Kraft besser zu verstehen, versuchen Forschende am PSI, ihre letzten Rätsel zu lösen. Die Erkenntnisse öffnen neue Möglichkeiten für so ungewöhnliche Anwendungen wie Materialien mit Formgedächtnis, intelligente Nanoroboter, die sich per Fernsteuerung manövrieren lassen und beispielsweise in der Medizin eingesetzt werden könnten, oder neuartige logische Gatter aus Nanomagneten, die Computer noch kompakter und leistungsfähiger machen könnten.



Paul Scherrer Institut  
Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen PSI, Schweiz  
[www.psi.ch](http://www.psi.ch) | +41 56 310 21 11