

SCHWERPUNKTTHEMA

# FORSCHUNG FÜR PRÄZISE MEDIZIN

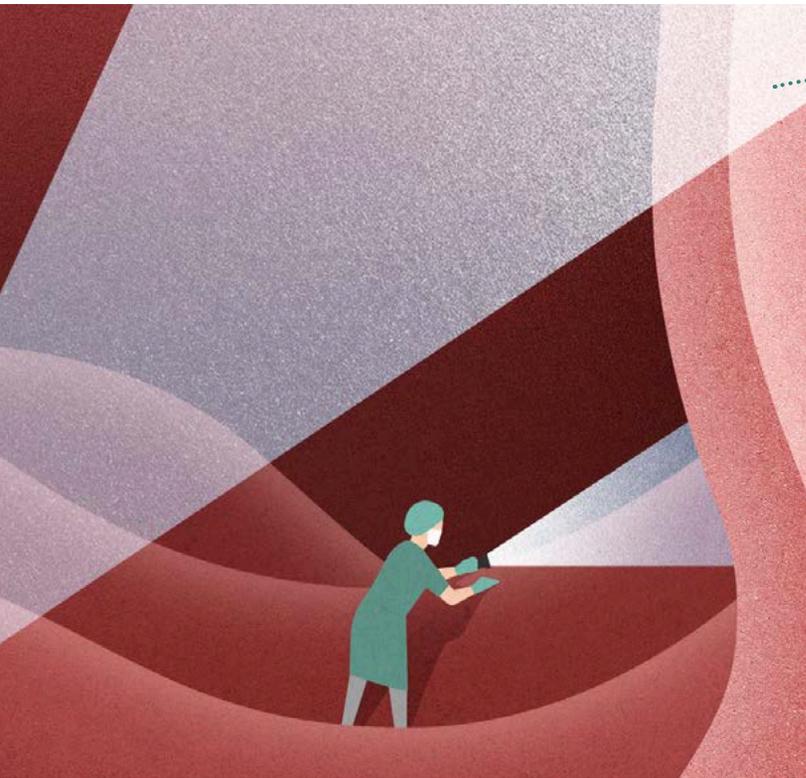
Das Magazin des Paul Scherrer Instituts

03 / 2019

# 2020



## SCHWERPUNKTTHEMA: FORSCHUNG FÜR PRÄZISE MEDIZIN



1

HINTERGRUND

### Krebszellen unter Beschuss

So präzise wie keine andere Behandlungsmethode gegen Tumore: die Protonentherapie. Nur das PSI bietet in der Schweiz diese Therapie an.

Seite 10



REPORTAGE

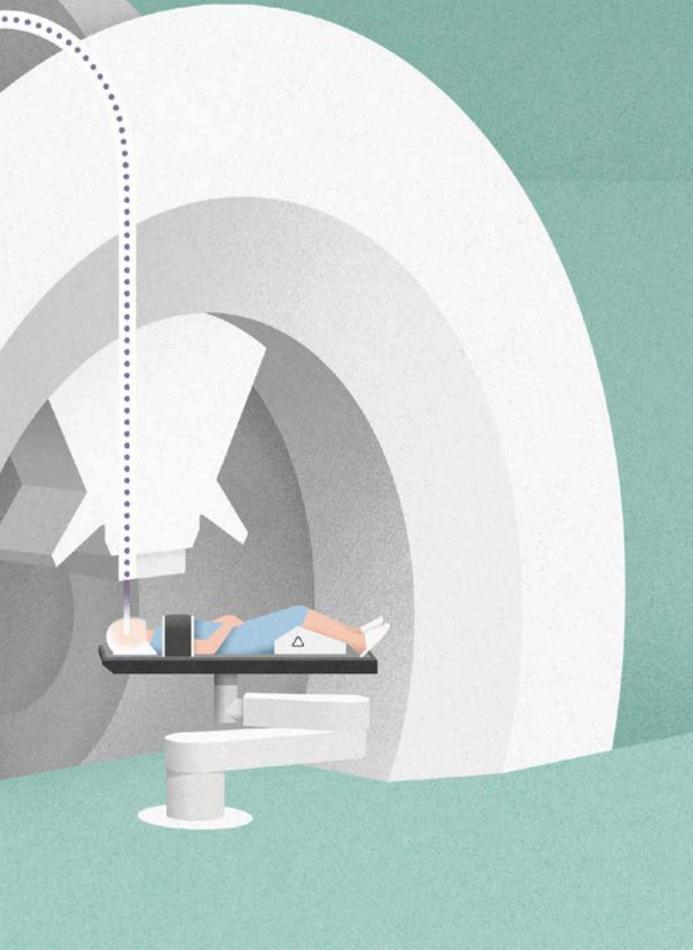
### Medikamente mit Strahlkraft

Die Radiopharmazie am PSI entwickelt strahlende Wirkstoffe, mit deren Hilfe sich Krebszellen aufspüren und bekämpfen lassen.

Seite 18

3





2

INFOGRAFIK

## Feuer frei auf Tumore

Vom Protonenbeschleuniger bis in das Gewebe von Patienten. Eine Grafik verrät, was bei der Bestrahlung von Patienten passiert.

Seite 16

### INHALT

<b>NACHGEFRAGT</b>	
<b>Was machen Sie da, Herr Strässle?</b>	4
<b>DAS PRODUKT</b>	
<b>Datenspeicher</b>	6
<b>DAS HELFERLEIN</b>	
<b>Einweg-Kaffeelöffel</b>	7
<b>§ SCHWERPUNKTTHEMA:</b>	
<b>§ FORSCHUNG FÜR PRÄZISE MEDIZIN</b>	8
<b>§ HINTERGRUND</b>	
<b>§ Krebszellen unter Beschuss</b>	10
<b>§ INFOGRAFIK</b>	
<b>§ Feuer frei auf Tumore</b>	16
<b>§ REPORTAGE</b>	
<b>§ Medikamente mit Strahlkraft</b>	18
<b>IM BILD</b>	
<b>Niels Schröter</b>	21
<b>IN DER SCHWEIZ</b>	
<b>5 000 000 000 000 000 Bytes von Villigen nach Lugano</b>	22
Wie Forscher und Ingenieure die Datenflut am PSI bändigen.	
<b>IN KÜRZE</b>	
<b>Aktuelles aus der PSI-Forschung</b>	26
1 Das Energiesystem der Zukunft	
2 PSI-Bildgebung hilft bei Raketenstarts	
3 Molekulare Schere stabilisiert Zell-Skelett	
<b>§ GALERIE</b>	
<b>§ Hand in Hand für die Gesundheit</b>	28
Die Menschen vor und hinter den Kulissen der Protonentherapie.	
<b>ZUR PERSON</b>	
<b>Er macht seine Träume wahr</b>	34
Früher arbeitete Philippe Stutz am PSI als Techniker, heute ist er Goldschmied in Luzern.	
<b>WIR ÜBER UNS</b>	38
<b>IMPRESSUM</b>	40
<b>AUSBlick</b>	41



NACHGEFRAGT

## Was machen Sie da, Herr Strässle?

Am PSI werden mit einem hier erfundenen Verfahren Protonen auf Tumore geschossen und damit zerstört. Das bedeutet Heilung für bisher Tausende von Krebskranken, darunter mehr als 500 Kinder. Thierry Strässle, Direktor ad interim, erklärt, wie das PSI Patienten hilft – nicht nur mit dieser Protonentherapie.

1

### Herr Strässle, aus der ganzen Schweiz kommen Patienten nach Villigen, um sich am PSI behandeln zu lassen. Wieso?

Weil sie sich bei uns einer ganz besonderen Therapie unterziehen können, der sogenannten Protonentherapie. Das PSI ist die einzige Institution in der Schweiz, die diese Bestrahlungsmöglichkeit zur Behandlung von Tumoren anbietet. Am PSI behandeln wir Patientinnen und Patienten damit bereits seit mehr als 30 Jahren – und erzielen einzigartige Erfolge. Nicht zuletzt wurde hier die Spot-Scanning-Technik entwickelt, die mittlerweile weltweit bei der Heilung von Krebskranken hilft. Bei dieser Technik rastert ein dünner Protonenstrahl einen Tumor im Körperinneren präzise ab und vernichtet ihn so. Der Strahl wirkt nur in der Tiefe, wo der Tumor sitzt; davor- und dahinterliegendes gesundes Gewebe wird geschont.

2

### Das PSI ist doch ein Forschungsinstitut und keine Klinik. Wie passt das zusammen?

Die Protonentherapie ist ein sehr gutes Beispiel dafür, wie Grundlagen- und Anwendungsforschung ineinandergreifen und Nutzen für viele Menschen schaffen. Hier in Villigen haben wir bereits mehr als 7200 Patienten behandelt, darunter mehr als 500 Kinder. Letztere profitieren besonders von der sehr präzisen und schonenden Protonentherapie. Das ist nur möglich, weil wir hier über Jahrzehnte geforscht haben: sowohl für Aufbau und Betrieb der notwendigen Anlagen als auch für die Entwicklung neuer Methoden zur Bestrahlung. Wir ruhen uns aber nicht auf dem Erfolg aus, sondern forschen weiter, um die Behandlungsmöglichkeiten stetig zu verbessern. Das gilt selbstverständlich auch für das zweite Gebiet der medizinischen Forschung, auf dem wir uns engagieren: die Radiopharmazie.

3

### Was ist das?

Dabei wird ein radioaktives Element mit einem Molekül verbunden, das sich an Krebszellen heftet. Über eine Infusion gelangt der Wirkstoff in die Blutbahn des Patienten. Das geschieht in einer der Kliniken, die sich in der Nähe des PSI befinden. In der Nähe deshalb, weil die Wirkstoffe aufgrund ihres radioaktiven Zerfalls meist nicht sehr lange haltbar sind und binnen sehr kurzer Zeit zur Anwendung kommen müssen. Hat sich der Wirkstoff an die Krebszellen geheftet, sorgt das radioaktive Element dafür, dass Ärzte den Tumor und seine Ableger genau lokalisieren können. Bei einigen Wirkstoffen kann die radioaktive Strahlung den Tumor sogar schädigen und damit bei der Heilung helfen. Auch mit dieser Forschung nehmen wir weltweit eine Spitzenposition ein und tragen zum Fortschritt in der Medizin bei.



So manches, was am PSI untersucht wird, könnte eines Tages dazu beitragen, Alltagsprodukte zu verbessern. Zum Beispiel

## Datenspeicher

Je mehr Wissen die Menschheit generiert und in elektronischer Form abspeichert, desto mehr steigt auch der Strombedarf dafür. Sogenannte multiferroische Materialien könnten in der Zukunft energiesparende Datenspeicher ermöglichen, denn bei ihnen sind die elektrischen und magnetischen Eigenschaften aneinandergelockt. Somit würde es genügen, ein elektrisches Feld anzulegen, um magnetische Bits und Bytes zu speichern. Dies würde deutlich weniger Strom benötigen als herkömmliche Magnetspeicher. Die Krux: Die meisten Multiferroika erhalten ihre besondere Eigenschaft nur weit unter null Grad Celsius.

Doch vor Kurzem gelang es Forschenden am PSI, ein neues, möglicherweise multiferroisches Material unter anderem aus Kupfer und Eisen zu erschaffen. Im Labortest behielt dieses die magnetische Eigenschaft sogar bei plus einhundert Grad Celsius – und damit auch bei der Betriebswärme von Computern.

Nun tüfteln die Forschenden weiter, um bei Betriebstemperatur nachweislich nicht nur die relevante magnetische, sondern auch die elektronische Eigenschaft und die Kopplung der beiden zu erhalten.

In der Spitzenforschung kommen manchmal überraschend alltägliche Hilfsmittel zum Einsatz. Zum Beispiel gewöhnliche

# Einweg-Kaffeelöffel

50 000 kleine Kaffeelöffel aus Kunststoff haben Forschende benutzt, um die gleiche Anzahl Proben für die Untersuchung an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS am PSI abzufüllen. Es handelte sich um eine Studie von Geologen aus Finnland, die das Gesteinspulver aus einem Bergwerk erforschten, in dem unter anderem Kupfer gefördert wird. Die 50 000 Proben waren in mehreren Hundert Bohrungen gesammelt worden. Das Ziel: eine detaillierte dreidimensionale Karte der dortigen Gesteinszusammensetzung und ein besseres Verständnis geologischer Formationen, das für die künftige Gewinnung von Metallen nützlich sein wird.

Dass für jede Probe ein eigenes Löffelchen benutzt wurde, liegt an der Empfindlichkeit der Untersuchungsmethode mit den Röntgenstrahlen der SLS: Jedes Stäubchen, das von der vorherigen Probe am Löffel verblieben wäre, hätte das Ergebnis verfälscht. Zugleich ermöglichte erst die Schnelligkeit der SLS-Methode dieses immense Projekt: Jede Probe war innerhalb von nur 12,8 Sekunden vermessen.

Am Ende behielten die Forschenden einige der Kunststofflöffel zur Erinnerung – der Rest kam ins Recycling.



HINTERGRUND

Krebszellen unter  
Beschuss

Seite 10

1

2

INFOGRAFIK

Feuer frei auf Tumore

Seite 16

SCHWERPUNKTTHEMA

# Forschung für präzise Medizin

Am PSI arbeiten Ärzte und Forscher daran, Tumore so exakt wie möglich zu lokalisieren und zu behandeln. Sie bestrahlen sie mit Protonen oder spüren sie mit komplexen Molekülen und Isotopen auf, um sie zu bekämpfen. Die Fortschritte, die sie dabei erzielen, dienen nur einem Zweck: der Gesundheit der Patienten.

3

REPORTAGE

Medikamente mit Strahlkraft

Seite 18



Diagnose Krebs:  
Wenn der Tumor ausfindig gemacht ist,  
lässt er sich meist auch behandeln.



# Krebszellen unter Beschuss

Am Paul Scherrer Institut PSI erhalten Krebskranke eine in der Schweiz einzigartige Therapie. Der Beschuss mit Protonen macht Tumoren den Garaus – und das so präzise wie mit keiner anderen Form der Bestrahlung. Das erweitert die Behandlungsmöglichkeiten bei komplizierten Fällen und insbesondere bei Kindern.

Text: Sabine Goldhahn

Olga Jose aktiviert die Gegensprechanlage. Während die Radiologie-Fachfrau einen der vielen Bildschirme mit ihren Augen fixiert, fragt sie: «Können wir bitte den Strahl haben.» Auf einem Monitor sieht sie das Bild, das eine Kamera im nur wenige Meter entfernten Therapieraum aufnimmt. Dort, an einem der drei Behandlungsplätze für Protonentherapie am PSI, der sogenannten Gantry 3, liegt ein junger Mann ganz ruhig auf einer Liege. Der Patient wartet auf die Bestrahlung. Nachdem Jose erfahren hat, dass der geforderte Strahl abgerufen werden kann, drückt sie auf den Bestrahlungsknopf.

Fünfundzwanzig Meter entfernt, hinter der Gantry 3, beginnen nun positiv geladene Teilchen, sogenannte Protonen, ihre Reise zum Patienten. Mit einer Geschwindigkeit von bis zu 175 000 Kilometer pro Sekunde – fast zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit – fliegen sie auf den jungen Mann zu. Sie durchdringen Haut und Gewebe, bis sie den Endpunkt ihres rasanten Fluges erreichen: die Krebszellen, die das Leben des Patienten bedrohen.

Der bleistiftdicke Protonenstrahl steuert sein Ziel äusserst präzise an. Nur weniger als einen Millimeter kann er davon abweichen und benachbartes, gesundes Gewebe treffen. «Im Vergleich zu anderen Bestrahlungsmethoden, beispielsweise mit Photonen, ist das eine sehr schonende Behandlung», sagt Barbara Bachtiry, Radioonkologin am PSI.

An dieser Meisterleistung der Präzision haben viele Mitarbeitende des PSI ihren Anteil. Mediziner, Physiker und Techniker arbeiten am Zentrum für Protonentherapie ZPT tagtäglich daran, Protonen möglichst genau in Tumore zu lenken und diese zu zerstören. Dabei bauen sie auf ihr jeweiliges Expertenwissen, die richtige Infrastruktur und viele Jahre Erfahrung. Hier, in Villigen, werden Krebspatienten immerhin schon seit 35 Jahren mit massgeschnei-

derter Protonentherapie behandelt. Massgeschneidert heisst: die richtige Dauer, Intensität und Häufigkeit der Bestrahlung am richtigen Ort. Mit einer derart individuell angepassten Strahlentherapie haben die Spezialisten am PSI schon mehr als 8000 Krebspatienten geholfen, ihre Erkrankung zu besiegen.

## Diagnose: Krebs

Auch der junge Patient – nennen wir ihn Noah Schmid – ist wegen dieser technologisch fortschrittlichsten Methode zur Krebsbestrahlung ans PSI gekommen.

Die ersten Krankheitszeichen seien ganz unspezifisch gewesen, erinnert er sich: Schnupfen und leichte Kopfschmerzen. Als keine Medikamente halfen, sei er zum Arzt gegangen. Schon nach wenigen Untersuchungen stand fest: Eine seltene Krebsgeschwulst breitete sich in seinen Nebenhöhlen und im Rachenraum aus, wucherte entlang der Riechnerven zum Gehirn und befiel einen Lymphknoten nach dem anderen, bis hinunter zum Hals. Keine Frage: Der Tumor musste raus. Doch durch die Nähe zu den Sehnerven durften die Chirurgen nur sehr vorsichtig operieren und konnten nicht alle bösartigen Zellen entfernen. Es folgten Chemotherapie und eine Anfrage beim Paul Scherrer Institut. Die Ärzte wussten: Am PSI gibt es die Protonentherapie, und die kann Noah Schmid helfen.

«Krebszellen wachsen oft sehr nahe an empfindlichen Strukturen wie Sehnerv, Innenohr oder Rückenmark», erklärt Barbara Bachtiry. «Herkömmliche Strahlentherapie würde diese Strukturen ebenfalls treffen und dadurch Nebenwirkungen verursachen.» Die Protonentherapie hingegen ist von allen Bestrahlungsarten gegen Krebs diejenige, welche am genauesten gerichtet und dosiert werden

kann. Das schont gesundes Gewebe. Deshalb verwenden Ärzte diese Form der Bestrahlung vor allem bei Tumoren im Kopf- und Halsbereich, wo oft wenige Millimeter darüber entscheiden, ob ein Patient beispielsweise erblindet oder sein Gehör verliert. So fürchtet auch Noah Schmid um sein Augenlicht. Seine Stimme wird leise, als ihm Bachtary behutsam erklärt, wie nah der Protonenstrahl an den Sehnerv herankommen wird: fünf Millimeter. Diese Sicherheitszone will die Ärztin unbedingt einhalten.

Um die Bestrahlung so genau wie möglich zu planen, werden von jedem Patienten zunächst aktuelle Schichtbilder vom Kopf und Hals angefertigt. Zu diesem Zweck hat das ZPT eigene medizinische Grossgeräte wie Computertomograf (CT) und Magnetresonanztomograf (MRT). Die Geräte liefern sehr detaillierte Bilder, die Kopf und Hals in Schichten von weniger als einem Millimeter Dicke zeigen. Auf den schwarz-weißen Aufnahmen erkennt Bachtary die Knochenstrukturen und Weichgewebe, wie etwa Nervenstränge. Am Monitor zeichnet sie mit dünnen, farbigen Linien die Umrisse von empfindlichen Strukturen und Tumorresten nach. Das erfordert Übung, doch die Ärztin hat in ihrem Leben schon zigtausende Aufnahmen gesehen.

Diese Bilder sind dann die Grundlage für die Behandlung und das wichtigste Werkzeug für den Bestrahlungsplan: Rot schraffiert ist der Bereich, den die Protonen am stärksten treffen sollen, also Krebsgewebe und befallene Lymphknoten. Eine

blaue Fläche daneben zeigt die Areale, welche vielleicht auch noch Tumorzellen enthalten und ebenfalls mit einer starken Dosis bestrahlt werden sollen. Daneben folgen gelbe Areale, wo gefährdete Strukturen liegen und nur eine schwache Protonendosis auftreffen darf. Grün umrahmt sind schliesslich noch einzelne Krebszellnester entlang der Blut- und Lymphgefässe am Hals.

### Sicherheit durch Teamarbeit

Schon im Vorfeld der Bestrahlungsplanung haben sich die Mediziner am PSI bei jenen Ärzten über den Patienten informiert, die ihn vorher behandelt hatten.

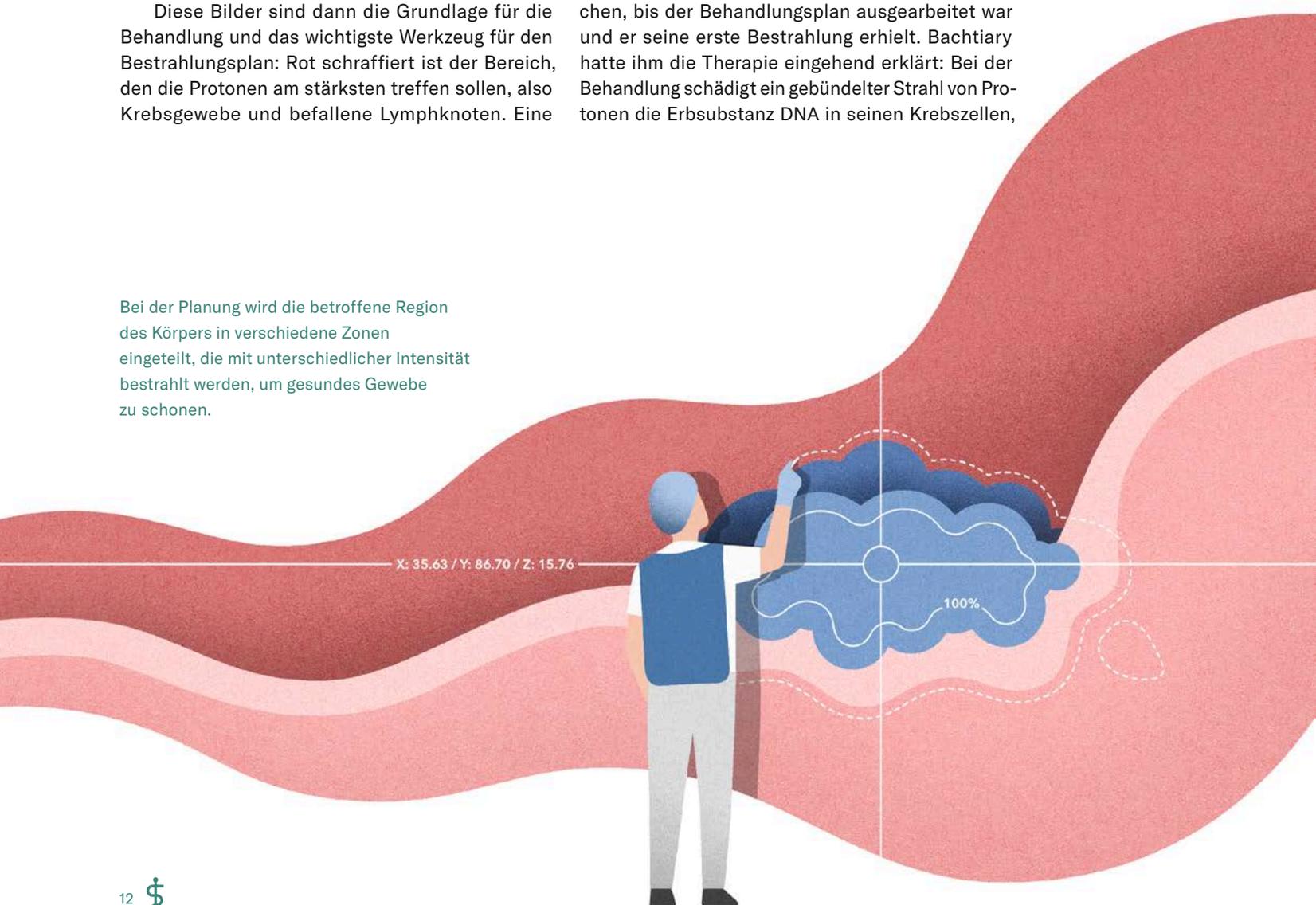
«Wir legen sehr viel Wert auf die enge Zusammenarbeit mit den Medizinerinnen der zuweisenden Kliniken und schätzen den fachlichen Austausch mit allen Schweizer Universitäts- und Kantonsspitalern. In den letzten drei Jahren wurden uns die meisten Patienten aus dem Universitätsspital Zürich, dem Inselspital Bern und den Kantonsspitalern St. Gallen und Aarau zugewiesen», sagt Damien Charles Weber, Leiter und Chefarzt des ZPT.

Bei Noah Schmid dauerte es knapp drei Wochen, bis der Behandlungsplan ausgearbeitet war und er seine erste Bestrahlung erhielt. Bachtary hatte ihm die Therapie eingehend erklärt: Bei der Behandlung schädigt ein gebündelter Strahl von Protonen die Erbsubstanz DNA in seinen Krebszellen,

Bei der Planung wird die betroffene Region des Körpers in verschiedene Zonen eingeteilt, die mit unterschiedlicher Intensität bestrahlt werden, um gesundes Gewebe zu schonen.

X: 35.63 / Y: 86.70 / Z: 15.76

100%



wodurch diese ihre Fähigkeit zur Zellteilung und Vermehrung verlieren und absterben. Der entscheidende Vorteil bei der Bestrahlung mit Protonen: Die schnellen schweren Teilchen lassen sich sehr gut lenken und bremsen, damit sie ihre maximale Energie nur im Tumor deponieren. Sie verlieren bloss sehr wenig Energie auf dem Weg dorthin und stoppen exakt im Tumorgewebe, was wiederum gesundes Gewebe vor und hinter der Geschwulst schont. Der Erfolg der Protonentherapie hängt also letztlich davon ab, dass die Bestrahlung des Tumorgewebes so exakt wie möglich erfolgt.

Patient Schmid weiss, dass er sieben Wochen lang jeden Tag ans PSI kommen und auf dem Behandlungstisch der Gantry 3 möglichst regungslos liegen muss. Obwohl eine einzelne Bestrahlung in ein bis zwei Minuten vorbei ist, kann ein ganzer Bestrahlungsdurchgang mit Umlagerung des Patienten über eine Stunde dauern.

### Bloss nicht bewegen

Doch bevor es losgeht, muss Schmid es geduldig über sich ergehen lassen, dass die Radiologie-Fachfrau Olga Jose ihm ein Kissen und eine Kopfmassage aus Kunststoff anpasst. Beides wird mit Druckknöpfen an der Behandlungsliege in der Gantry befestigt. «Für einige Patienten ist es unangenehm, wenn sie ihren Kopf und ihr Gesicht während der Bestrahlung nicht bewegen können», erklärt Jose. «Die Maske hilft, dass wir sie an jedem Tag der mehrwöchigen Behandlung genau gleich positionieren können.» Trotzdem dauert es vor der ersten Bestrahlung noch eine halbe Stunde, bis sich Kopf, Hals und Schultern des Patienten an genau demselben Ort in der Bestrahlungsposition befinden wie auf den Planungsbildern vorgesehen. Die Übereinstimmung kontrollieren Jose und Bachtiry noch einmal gemeinsam.

Die Radiologie-Fachfrau fährt die Gantry auf die erste Bestrahlungsposition für die nun anstehende Behandlung, dann verlässt sie den Bestrahlungsraum und begibt sich in den Kontrollraum, von dem aus sie das Verfahren starten kann.

### Die Sicherheit im Blick

Hier zeigen neunzehn Monitore Bilder der Kameras aus dem Behandlungsraum, den Weg des Protonenstrahls, die Funktionsfähigkeit der Sicherheitssysteme und vieles mehr. Besonders wichtig: der Bestrahlungsplan. Aufmerksam blickt Jose auf einen Bildschirm nach dem anderen. Sie kontrolliert die

richtige Position, die Reihenfolge der Bestrahlungsfelder und beobachtet, ob der Patient ruhig liegt. Alles scheint okay. Die Maschinerie, die für eine ordnungsgemässe Bestrahlung des Patienten sorgt, arbeitet reibungslos.

Kopf und Hals des Patienten werden aus vier verschiedenen Richtungen bestrahlt. Deshalb muss die Gantry beziehungsweise ihr Bestrahlungskopf um den Patienten herumgedreht werden. Hinter einer weissen Wand verborgen, arbeiten dafür zwei Elektromotoren mit jeweils zehn PS, um den gewaltigen Drehkörper der Gantry mit 220 Tonnen zu bewegen.

### Bestrahlungstechnik am PSI entwickelt

Im Bestrahlungsraum verrät kein Geräusch, dass die Protonen nun mit zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit in den Körper von Noah Schmid eindringen und im Tumor abrupt stoppen. Wie bei einer Vollbremsung geben sie dabei ihre ganze Energie ab und erreichen damit ihre maximale Wirkung. Hinter diesem Energieabfall, Bragg Peak genannt, kommt keine Strahlung mehr an. Diese besondere physikalische Eigenschaft der Protonen liegt der Spot-Scanning-Technik zugrunde, die vor über zwanzig Jahren hier am PSI entwickelt wurde. Damien Weber: «Das Verfahren verhalf der Protonentherapie weltweit zum Durchbruch, denn es ermöglichte überhaupt erst, Patienten in angemessener Zeit zu behandeln und sehr unregelmässig geformte Tumore exakt zu bestrahlen.» Bei der Spot-Scanning-Technik rastert der bleistiftdünne Protonenstrahl den Tumor von hinten nach vorne, Ebene für Ebene und Reihe für Reihe ab: zuerst die am tiefsten liegende Schicht des Tumors und dann die nächsthöher liegende und so fort. Ohne die damit erreichbare Präzision hätten Patienten wie Noah Schmid ebenso wenig eine Chance auf eine erfolgreiche Behandlung wie viele Kinder.

«Wir legen sehr viel Wert auf die enge Zusammenarbeit mit den Medizinerinnen der zweiseitigen Kliniken.»

Damien Charles Weber, Leiter und Chefarzt des Zentrums für Protonentherapie ZPT

Der Protonenstrahl gibt seine Energie genau im Tumor ab. Er rastert das Krebsgewebe zeilenweise in Schichten ab und zerstört es.



«Bei Kindern liegen empfindliche Organe und Strukturen sehr nah beieinander. Ihre Zellen haben noch viele Zellteilungen vor sich und somit Jahrzehnte Zeit, Mutationen zu bilden und zu entarten. Deshalb sollte man ihre Zellen im Kindesalter möglichst wenig ionisierenden Strahlen aussetzen, die ein zusätzliches Risiko darstellen. Zudem vertragen sie nur eine geringe Strahlendosis», erklärt Weber. «Wenn Kinder Krebs haben, ist die viel genauer anwendbare Protonentherapie für sie besser geeignet als herkömmliche Strahlentherapie mit Photonen. Diese lassen sich nicht so gut fokussieren, weil sie ihre Energie nicht so punktgenau abgeben wie Protonen. Deshalb schädigen sie auch Gewebe vor und hinter den Tumoren oft stärker.» Das Team am ZPT hat bei der Protonenbestrahlung der kleinen Krebspatienten grosse Erfahrung: Unterstützt von Kinder- und Narkoseärzten wurden hier schon über 500 Kinder behandelt, die meisten von ihnen nach genau definierten Therapieprotokollen im Rahmen internationaler Studien.

#### Nachsorge zum Wohl der Patienten

Alle wichtigen Informationen zur Behandlung und zum Befinden der kleinen und grossen Patienten werden akribisch in einer Datenbank gesammelt.

Ulrike Klietsch, die am ZPT für Patientenstudien verantwortlich ist, erzählt: «Bei uns laufen regelmässig Studien zur Wirksamkeit unserer Therapie. Zudem werden Kinder im zentralen Kinder-Krebsregister der Schweiz erfasst. Das erlaubt später Rückschlüsse auf die wirksamsten Bestrahlungsparemeter, allfällige Nebenwirkungen und die Lebensqualität. Tumore bei Kindern sind sehr selten und man will möglichst viel darüber wissen.»

Wenn ein Patient seine Bestrahlung beendet hat, erfolgt nach acht bis zwölf Wochen die erste Kontrolluntersuchung, danach meist halbjährlich oder jährlich. Diese Nachsorge liegt allen Mitarbeitenden besonders am Herzen. Manche Patienten schicken später Postkarten und Dankesbriefe oder kommen fit und gesund persönlich vorbei. Das ist für das Team am ZPT das Schönste.

Noah Schmid hat seine erste Bestrahlung hinter sich. Die Maske wird ihm abgenommen und er streckt sich. Das reglose Liegen war anstrengend. Bachtiry und Jose reichen ihm die Hand und verabschieden ihn. Bis zum nächsten Tag. ♦

# «Es ist wichtig, weiter zu forschen»

Die Protonentherapie ist aufwendig und teurer als die herkömmliche Strahlentherapie, doch ihre Treffsicherheit bei Tumoren ist unübertroffen. Davon ist nicht nur Damien Weber vom PSI überzeugt. Europaweit entstehen neue Zentren, um mehr Krebspatienten damit behandeln zu können. Das hilft nicht nur den betroffenen Kindern und Erwachsenen, sondern trägt auch zur Sicherheit bei.

## Herr Weber, wie kommt es, dass am PSI Patienten behandelt werden?

Die grössten und erfahrensten Protonentherapiezentren weltweit sind aus Forschungsinstituten hervorgegangen. Das hat historische Gründe. Man braucht eine riesige Infrastruktur und das PSI, wie auch andere Zentren, hatte diese. Das ermöglichte es überhaupt erst, die Methode zu entwickeln, sie patiententauglich zu machen und kontinuierlich zu verbessern. Die Protonentherapie braucht grosse Erfahrung, insbesondere für die Patientensicherheit und für noch bessere Ergebnisse.

## Das PSI hat das einzige Protonentherapiezentrum in der Schweiz. Reicht das, um alle Patienten zu versorgen?

Das ist eine heikle, aber wichtige Frage in einem Land, das die Gesundheitsversorgung auf kantonaler Ebene reguliert. Wenn man sich die Zahlen anschaut, reicht es im Moment, denn nicht alle Patienten, bei denen eine Protonentherapie angezeigt wäre, bekommen sie auch. Das Bundesamt für Gesundheit BAG hat eine Liste an Krebserkrankungen festgelegt, bei denen die Protonentherapie angewendet werden darf. Diese Liste umfasst derzeit zehn Indikationen bei Erwachsenen sowie sämtliche Tumore im Kindes- und Jugendalter bis achtzehn Jahre. In der Schweiz haben wir mit zwei Gantrys bereits mehr als doppelt so viele Bestrahlungsplätze pro Einwohner wie beispielsweise Grossbritannien. Ein Protonentherapiezentrum muss eine kritische Masse an Patienten aufweisen, um gut zu sein. Wenn es nur eine begrenzte Anzahl von Patienten hat, fehlt die Erfahrung.

## Wie werden die Indikationen zur Protonentherapie festgelegt?

Das ist in jedem Land anders. Die Liste in der Schweiz wurde vor zwanzig Jahren aufgestellt, als die Protonentherapie noch am Anfang war. Seitdem wurden keine neuen Krankheiten hinzugefügt. Auch wenn ich als Arzt von der Protonentherapie überzeugt bin: Wir müssen Daten liefern, die beweisen, dass die Protonentherapie der herkömmlichen Strahlentherapie überlegen ist und weniger Komplikationen macht, oder eben nicht. Doch die Patientenzahl in der Schweiz ist klein, deshalb muss man international zusammenarbeiten, um für die einzelnen Krankheitsbilder genügend zuverlässige Daten zur Protonentherapie zu bekommen.

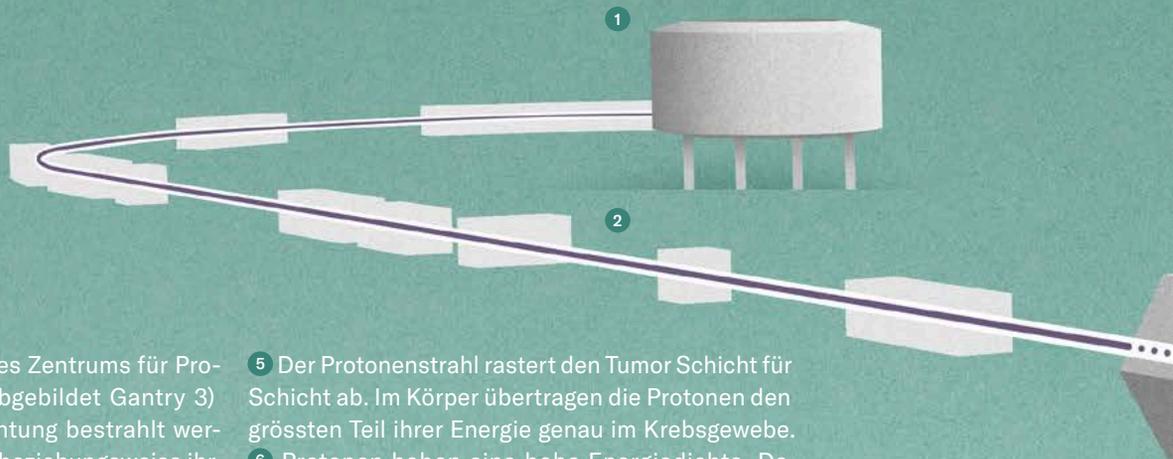
## Wie wollen Sie den Nachweis erbringen?

Die Zahl der Protonentherapiezentren in Europa steigt. Im Jahr 2024 werden es ungefähr dreissig sein. Einige von ihnen haben sich in einem Netzwerk, dem European Particle Therapy Network, zusammengeschlossen, um gemeinsam klinische Studien mit dreihundert und mehr Patienten durchzuführen. Das PSI war einer der Gründer dieses Netzwerks. Ausserdem ist das PSI assoziiertes Mitglied im amerikanischen NRG-Oncology-Netzwerk. Es ist geplant, dass das PSI in nicht allzu ferner Zukunft an ein bis zwei randomisierten Studien der Phase 3 teilnimmt. Bei einer wird es um Lungenkrebs gehen.

## Die Lunge bewegt sich beim Atmen. Kann man Lungenkrebs denn überhaupt so genau bestrahlen wie Tumore in anderen Körperregionen?

Wir haben eine Technik entwickelt, mit der das möglich ist. Vor Kurzem haben wir eine 17-jährige Frau erstmals damit behandelt. Es ist sehr ungewöhnlich, dass Kinder oder Jugendliche Lungenkrebs bekommen, unter dem sonst Erwachsene leiden. Jetzt ist sie krebsfrei. Das zeigt, wie wichtig es ist, auf diesem Gebiet zu forschen und die Methoden weiterzuentwickeln.

# Feuer frei auf Tumore



An den Behandlungsplätzen des Zentrums für Protonentherapie am PSI (hier abgebildet Gantry 3) können Tumore aus jeder Richtung bestrahlt werden. Deshalb muss die Gantry beziehungsweise ihr Bestrahlungskopf um den Patienten herumgedreht werden. Der gewaltige Drehkörper 3 der Gantry ist 220 Tonnen schwer und bis zu 10,5 Meter breit. Diese Masse kommt unter anderem durch ein rotierendes Stahlgerüst, 9 Magnete zum Lenken des Protonenstrahls, das Vakuumrohr, in dem die Protonen gebündelt werden, Vorrichtungen zur Strahlendiagnostik und einen 1,5 Meter breiten Kabelschlepp zustande. Die Drehung selbst leisten 2 Elektromotoren mit jeweils 10 PS.

1 Ihren Ursprung nehmen die Protonen an der Ionenquelle, die im Ringbeschleuniger COMET sitzt. In ihr werden kontinuierlich Wasserstoffatome in Bruchteilen von Sekunden in negativ geladene Elektronen und positiv geladene Protonen zerlegt. Ein elektrisches Feld saugt die Protonen in den Ringbeschleuniger, wo sie 630 Mal auf einer Kreisbahn rotieren. Anschliessend werden sie in den Strahlengang geleitet 2 und dort mithilfe von Magneten gebündelt.

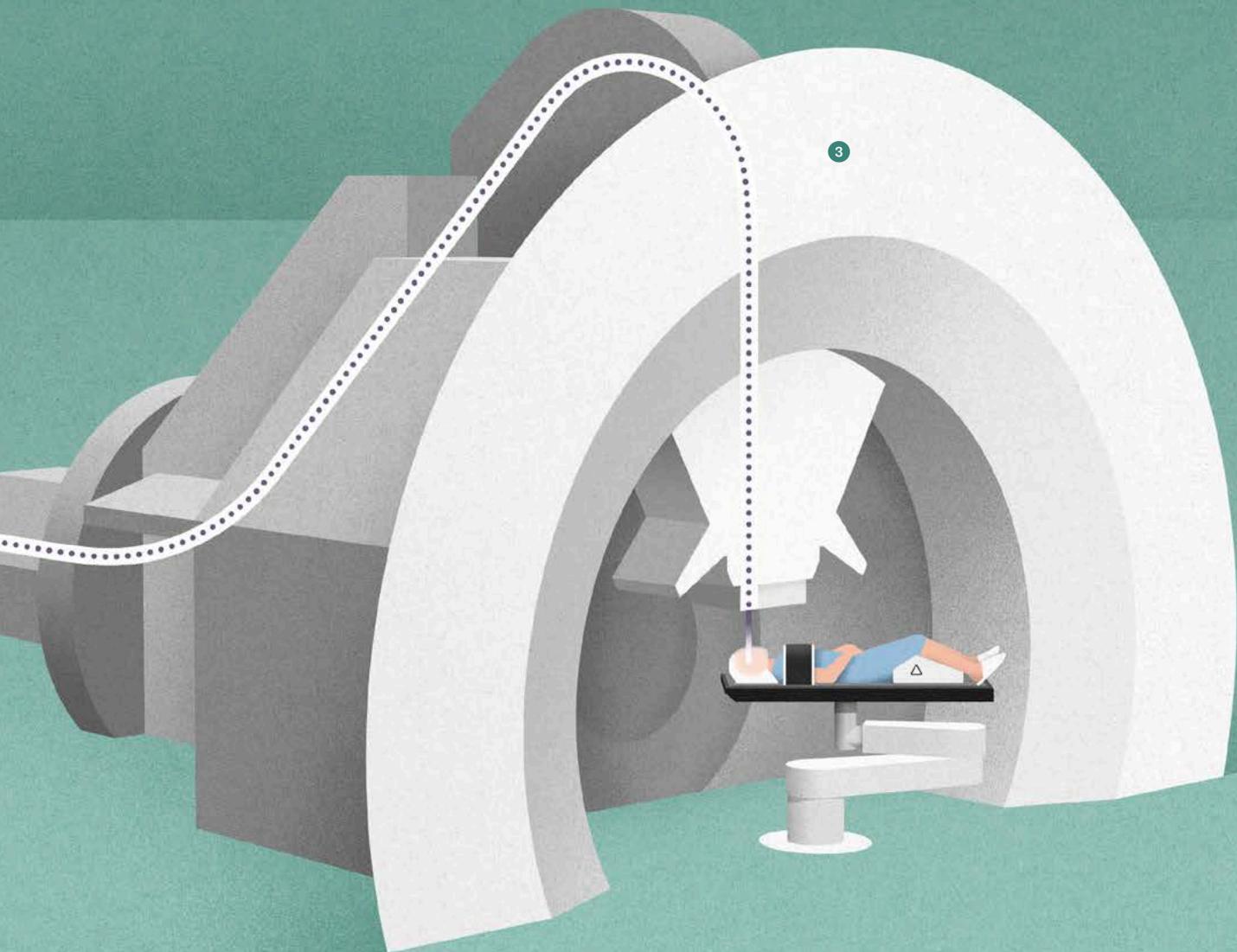
Die Protonen fliegen mit zwei Dritteln der Lichtgeschwindigkeit durch den 50 Meter langen Strahlengang zur Gantry 3 und werden gezielt auf den Tumor gefeuert. 4 Wie tief sie in den Körper eindringen, entscheidet ihre Energie. Für das richtige Energielevel sorgen Graphitkeile. Je dicker die Graphitschicht ist, die die Protonen durchdringen müssen, um so grösser ist die Bremswirkung und desto früher geben die Protonen ihre Energie im Gewebe ab. Wie weit diese Keile in den Strahlengang eingerückt werden müssen, bestimmt ein Dosimetrist bei der Therapieplanung.

5 Der Protonenstrahl rastert den Tumor Schicht für Schicht ab. Im Körper übertragen die Protonen den grössten Teil ihrer Energie genau im Krebsgewebe.

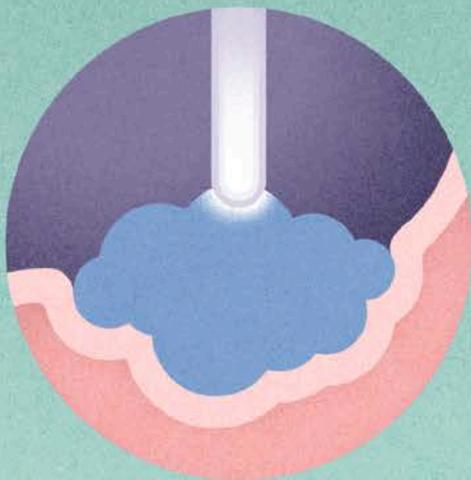
6 Protonen haben eine hohe Energiedichte. Dadurch kommt es in der Krebszelle zu direkten Schäden an der Erbsubstanz DNA, die sich im Zellkern befindet und alle wichtigen Informationen für das Überleben der Zelle enthält. Ebenfalls entstehen durch die aufgenommene Energie in der Zelle sehr reaktive Verbindungen, sogenannte freie Radikale. Auch diese freien Radikale schädigen die DNA der Zelle 7.

Die Folge ist, dass Krebszellen, deren DNA stark beschädigt ist, nicht überleben können. Die Überbleibsel der abgestorbenen Zellen werden vom Immunsystem des Körpers beseitigt. Genau das ist das Ziel der Protonentherapie.

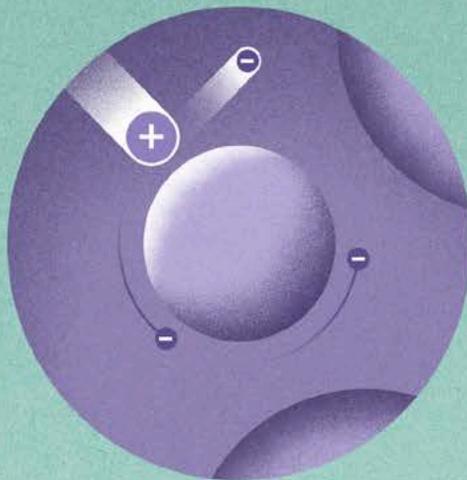




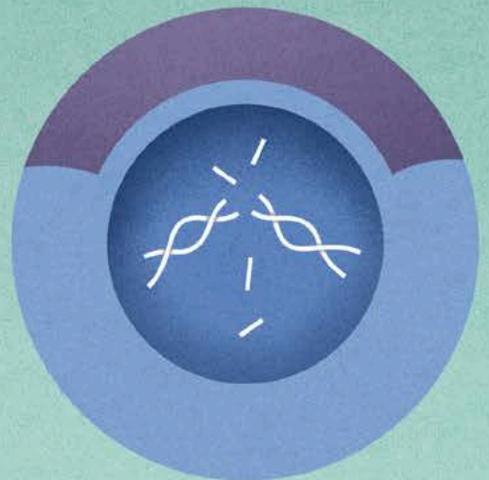
3



5



6



7



# Medikamente mit Strahlkraft

Im Dienst der Kranken arbeiten PSI-Wissenschaftler mit radioaktiven Stoffen und entwickeln Arzneimittel, die Strahlung aussenden. Damit helfen sie, Krebsleiden und Entzündungen aufzuspüren und Tumore am Wachstum zu hindern. Ihre Forschung unterstützt Spitäler und ist für die Schweizer Industrie von grossem Interesse.

Text: Sabine Goldhahn

Der Wettlauf gegen die Zeit startet Montagmorgen im Reinraumlabor des Zentrums für radiopharmazeutische Wissenschaften ZRW am PSI. Ärzte vom Kantonsspital Baden wollen einen Patienten mit Prostatakrebs untersuchen und haben dafür beim PSI ein Radiopharmakon bestellt, ein radioaktives Arzneimittel. Mit seiner Hilfe wollen die Mediziner Tumorzellen im Patienten aufspüren. Das Arzneimittel besteht aus zwei Hauptkomponenten. Ein Teil, der sogenannte Tracer, passt genau zu Zielstrukturen, die auf der Oberfläche von Tumorzellen sitzen, und heftet sich dort an. Die zweite

Komponente signalisiert den Ort durch Radioaktivität. Sie besteht nämlich aus einem Radionuklid. So heissen instabile Atome, die bei ihrem Zerfall Strahlung aussenden. Für medizinische Zwecke werden Radionuklide mit einer Halbwertszeit von wenigen Minuten bis eine Woche verwendet. Wegen der Radioaktivität ist ihre Herstellung nur unter bestimmten Sicherheitsvorkehrungen erlaubt, die am PSI gegeben sind. Für die Diagnostik des Prostatakarzinoms stellt das Team im Reinraumlabor das radioaktive Arzneimittel  $^{68}\text{Ga}$ -PSMA-11 her. Dafür hat es zwei Tage Vorlauf, doch Mittwoch,

am Produktionstag, muss es sich beeilen – in nur 68 Minuten verliert das verwendete Radionuklid die Hälfte seiner Strahlkraft.

10:00 Uhr: In einer mit dicken Bleiplatten abgeschirmten sogenannten heissen Zelle startet auf Knopfdruck die Synthese des Wirkstoffs. Langsam tropft eine unscheinbare, klare Flüssigkeit vom Syntheseapparat in ein Gefäss.

10:40 Uhr: Die Flüssigkeit mit dem Wirkstoff wird in ein daumengrosses Glasfläschchen abgefüllt und in einen strahlensicheren Behälter gepackt.

11:00 Uhr: Das Medikament ist zum Versand per Gefahrguttransport bereit. Der Behälter wird 30 Minuten später im Spital ankommen. Dort wartet bereits der Patient.

11:30 Uhr: Das Team am PSI kontrolliert eine zurückbehaltene Probe des Arzneimittels auf seine Qualität und Reinheit und informiert die Klinik über die Freigabe.

12:00 Uhr: Das Fachpersonal zieht mit einer Spritze die für den Patienten berechnete Wirkstoffmenge auf und spritzt sie in dessen Venen. Die Untersuchung geht los.

Einmal im Blutkreislauf angekommen, sucht sich das radioaktive Arzneimittel sein Ziel im Körper: die Krebszellen. Diese tragen auf ihrer Oberfläche Strukturen, die charakteristisch für eine Krebsart sind, und die gesunde Zellen nicht aufweisen. An diese Strukturen dockt das Arzneimittel an, das an das Radionuklid gekoppelt ist.

Die radioaktive Strahlung der Arznei macht winzige Ableger des Tumors sichtbar, die man sonst nicht sehen würde. Das gelingt mithilfe von Spezialkameras. Sie erfassen die Strahlung, die der Wirkstoff aus dem Körper des Patienten nach aussen schickt. Daraus errechnet ein Computer Bilder, auf denen Tumorherde farbig erscheinen und gut erkennbar sind. Auch an diesem Tag erfüllt der eingesetzte Wirkstoff seine Aufgabe und die Ärzte am Kantonsspital Baden wissen nun, wo sich der Tumor und seine Ableger im Körper ihres Patienten befinden. Diese Informationen werden genutzt, um eine auf die Situation des Patienten abgestimmte Therapie zu entwickeln.

Aber strahlende Substanzen können weitaus mehr, als Krebszellen aufzuspüren. «Die Eigenschaften eines Radionuklids bestimmen, ob man es zur Diagnostik verwendet oder ob man damit die Krebszellen gezielt zerstört», erklärt Roger Schibli, Leiter des ZRW, einer gemeinsamen Einrichtung des PSI, der ETH Zürich und des Universitätsspitals Zürich. Manche Radionuklide wie Lutetium-177 senden auch zerstörerische Teilchenstrahlung, sogenannte Betastrahlung, aus, die nur wenige Millimeter weit

reicht. Sie kann Krebszellen direkt zerstören, sobald das Radiopharmakon an ihnen andockt.

Die besondere Strahlencharakteristik von Lutetium-177 haben sich Chemiker Martin Béhé und seine Arbeitsgruppe am ZRW zunutze gemacht und das Radionuklid mit einem Minigastrin als Tracer gekoppelt. Dieses Molekül bindet sich ganz gezielt an den sogenannten Cholecystokinin-2(CCK2)-Rezeptor, den Tumorzellen des bösartigen medullären Schilddrüsenkarzinoms auf ihrer Oberfläche tragen. Bei dieser Art von Schilddrüsenkrebs ist die sonst etablierte Radio-Jod-Therapie nicht wirksam. Er bildet früh Tochtergeschwülste in anderen Organen und trifft manchmal auch Kinder und junge Erwachsene. «Wenn dieser Tumor Metastasen gebildet hat, war eine Heilung bisher nicht möglich», sagt Béhé. Deshalb suchte er mit seinem Team mehrere Jahre lang nach einem radioaktiven Wirkstoff, um die Tochtergeschwülste zu finden und zu vernichten. Die Forschenden prüften intensiv, welcher Wirkstoff schnell im Körper aufgenommen wird, nur an den CCK2-Rezeptor bindet und andere Gewebe schnell wieder verlässt, um mit seiner Strahlung keine gesunden Zellen zu schädigen. Diese und weitere spezielle Anforderungen erschwerten die Suche nach einer passenden Substanz. Erfolg hatte die Gruppe erst, als sie das Peptid Minigastrin (PSIG-2) mit dem Lutetium-177 kombinierte: Es reicherte sich gezielt an den Zellen des medullären Schilddrüsenkarzinoms an, verblieb nicht in anderen Geweben und wurde rasch aus den Nieren ausgeschieden, um dort keinen Schaden anzurichten. Damit waren die wichtigsten Voraussetzungen erfüllt, um den Wirkstoff im Reinraumlabor des PSI standardisiert nach pharmazeutischen Vorschriften herzustellen – der erste Schritt für den kontrollierten Einsatz am Patienten im Rahmen einer Studie.

«Die Eigenschaften eines Radionuklids bestimmen, ob man es zur Diagnostik verwendet oder ob man damit die Krebszellen gezielt zerstört.»

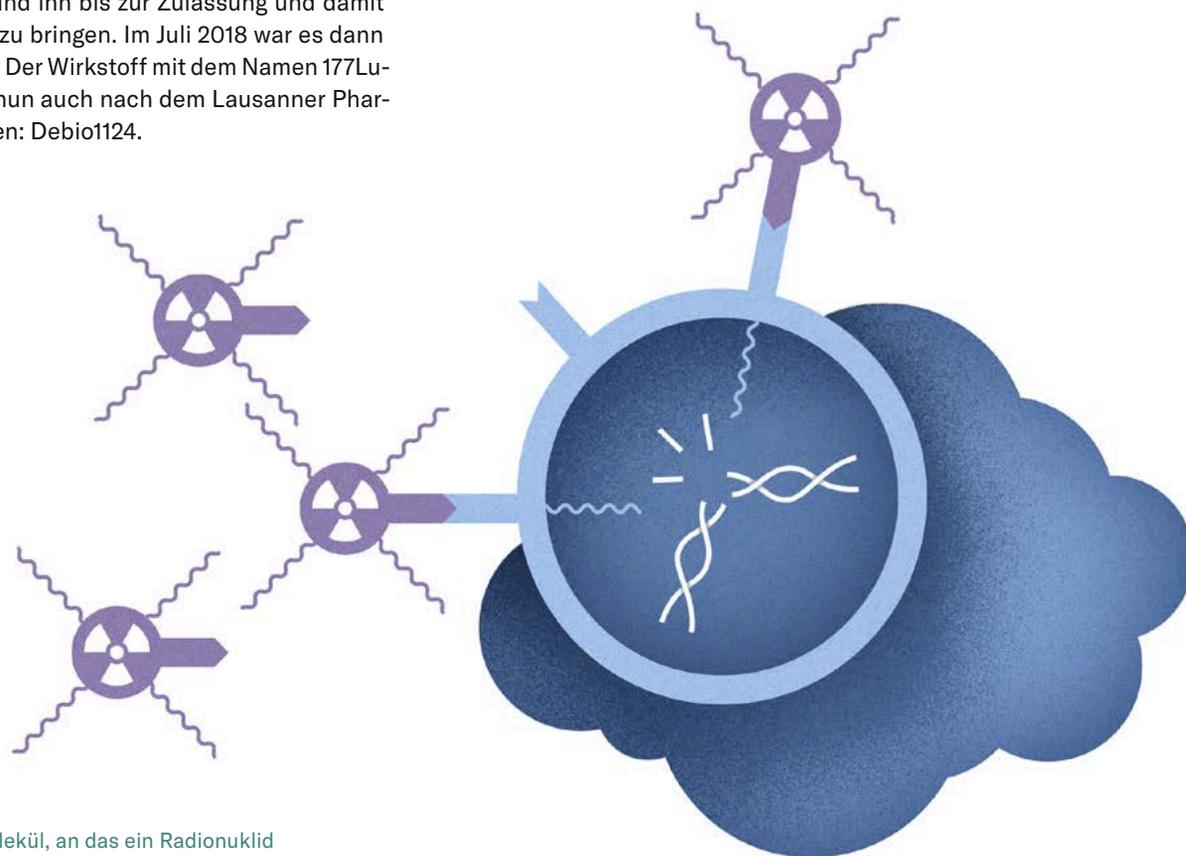
Roger Schibli, Leiter des Zentrums für radiopharmazeutische Wissenschaften ZRW

2016 war es dann soweit: Mit Erlaubnis der Schweizerischen Zulassungs- und Aufsichtsbehörde für Heilmittel Swissmedic durften Ärzte der Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin des Universitätsospitals Basel den neuen, inzwischen patentierten Wirkstoff erstmals am Menschen einsetzen. «In dieser ersten Studie haben wir den Wirkstoff sechs Patienten gegeben, die ein medulläres Schilddrüsenkarzinom in einem fortgeschrittenen Stadium hatten», berichtet der Basler Nuklearmediziner Christof Rottenburger.

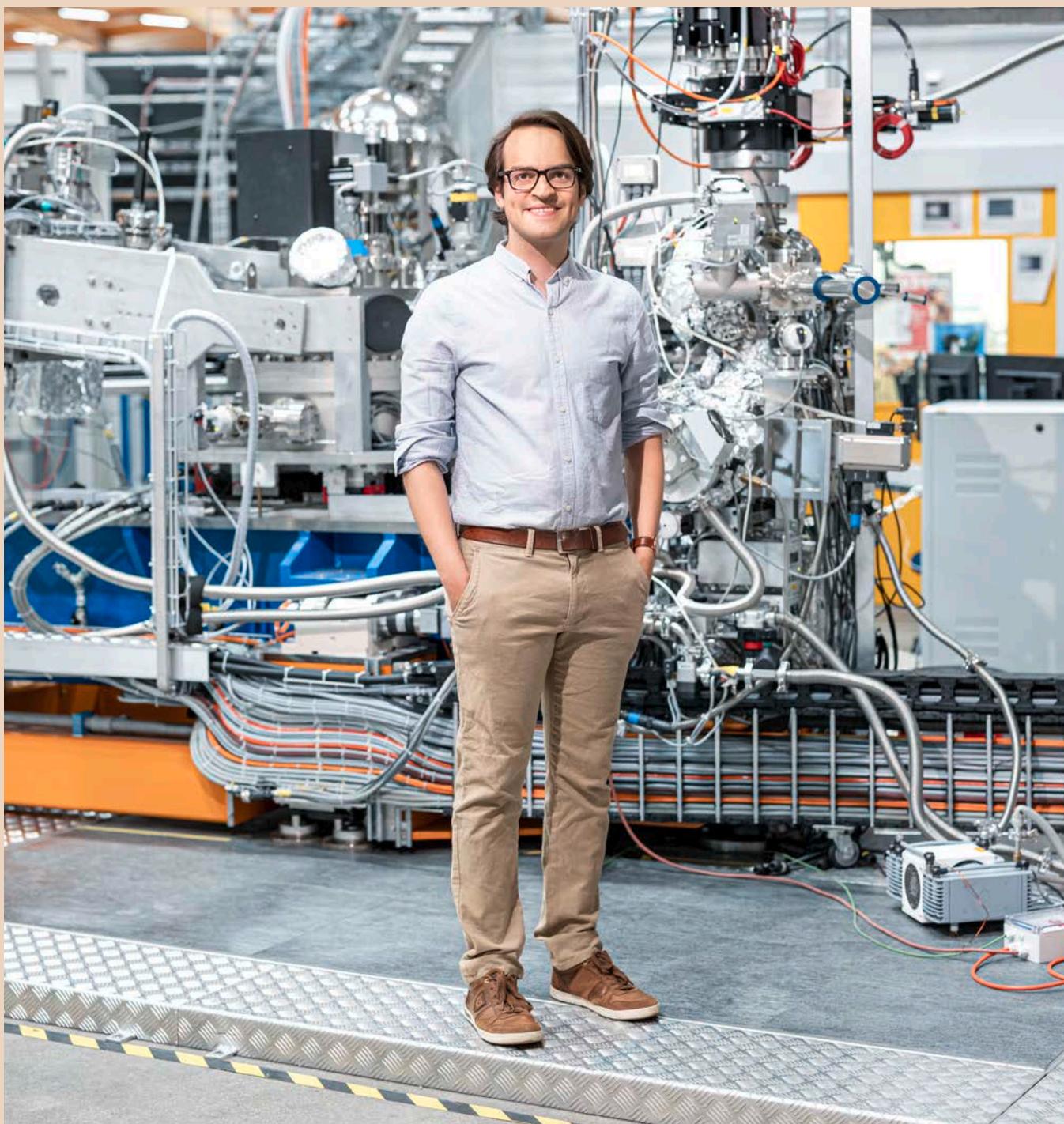
Zu dieser Zeit informierte das PSI auf seiner Webseite über die Entwicklung des Wirkstoffs und dessen Zulassung als Studienmedikament. Dieser Artikel weckte das Interesse der Schweizer Pharmaindustrie. Das Lausanner Unternehmen Debiopharm meldete sich bei Martin Behé am PSI. Die Geschäftsleute liessen sich erklären, woraus der Wirkstoff besteht und wie er im PSI-Labor hergestellt wird, sie stellten Fragen und prüften Unterlagen, und sie schauten sich die Ergebnisse der ersten Patientenstudie ganz genau an. Das Resultat überzeugte: Im Dezember 2017 unterzeichneten Debiopharm und das PSI einen Lizenzvertrag, der es dem Unternehmen erlaubte, den PSI-Wirkstoff für Anwendungen in der Krebsbehandlung weiterzuentwickeln und ihn bis zur Zulassung und damit zur Marktreife zu bringen. Im Juli 2018 war es dann endlich soweit. Der Wirkstoff mit dem Namen <sup>177</sup>Lu-PSIG-2 heisst nun auch nach dem Lausanner Pharmaunternehmen: Debio1124.

Am Universitätsspital Basel hat inzwischen der zweite Teil der Patientenstudie mit dem PSI-Wirkstoff begonnen. «Diese Studie ist eine sogenannte Dosis-Eskalationsstudie», erklärt Rottenburger. «Hier geben wir Patienten mit medullärem Schilddrüsenkarzinom eine als sicher erachtete Wirkstoffdosis und beobachten, ob sie diese Dosis gut und ohne höhergradige Nebenwirkungen an anderen Organen vertragen. Wenn dies der Fall ist, kann die Wirkstoffdosis dann weiter gesteigert werden.» Mit diesem Vorgehen tasten sich die Basler Mediziner gemeinsam mit dem PSI an die Strahlendosis heran, welche Patienten gefahrlos für eine Behandlung erhalten können. Für die Dauer der Studie wird das radioaktive Arzneimittel noch weiterhin im Reinraum am PSI hergestellt – so wie andere Radiopharmaka, die von den Kliniken der Region bestellt werden. Am ZRW tüfteln die Forschenden bereits an den nächsten vielversprechenden Substanzen. ♦

Und so werden die Radionuklide am PSI hergestellt: <https://www.psi.ch/de/media/forschung/im-fokus-der-protonen>

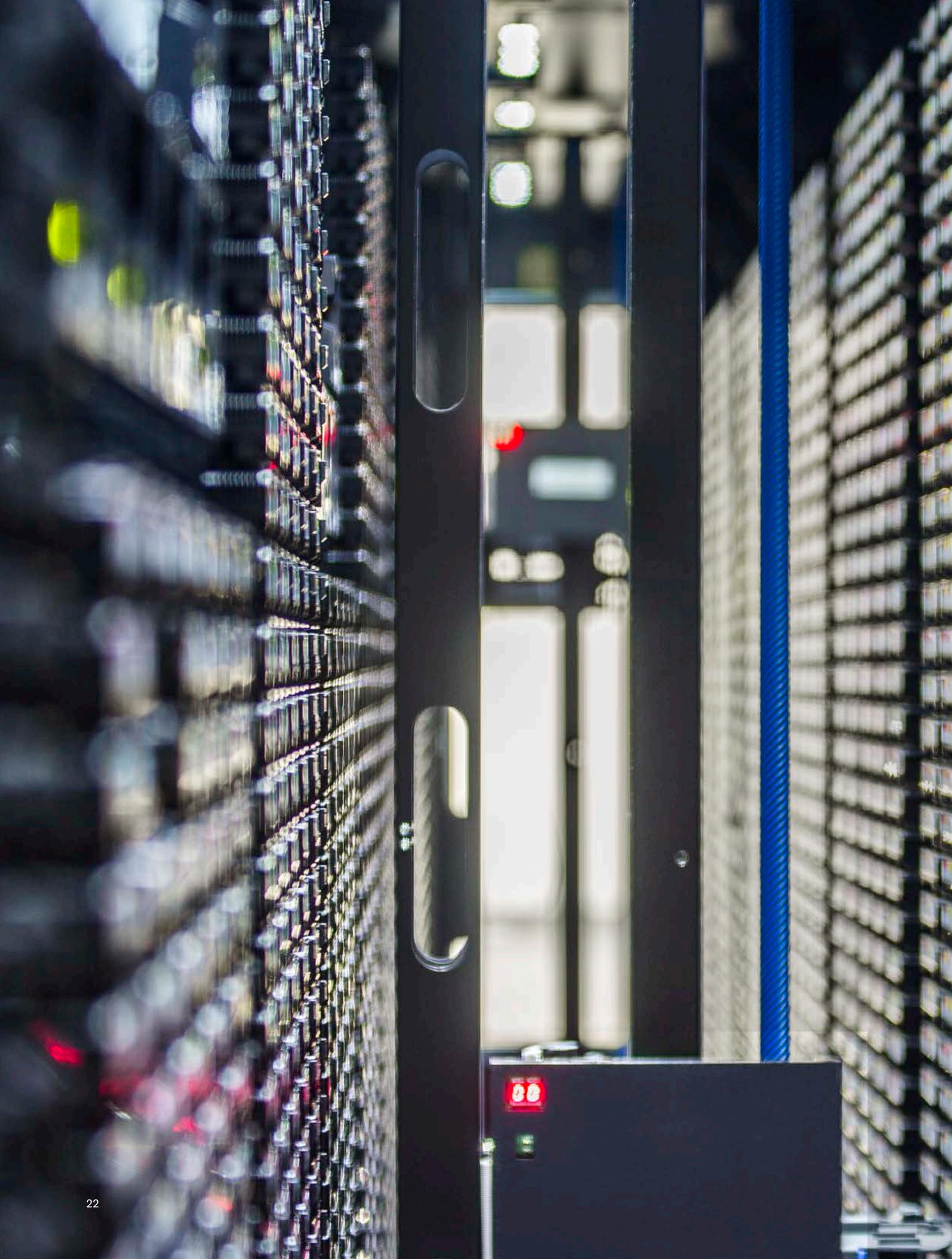


Das Detektormolekül, an das ein Radionuklid gekoppelt ist, bindet spezifisch an die Oberfläche von Tumorzellen. Die Strahlung des Radionuklids hilft bei der Lokalisierung von Tumoren und kann diese sogar zerstören.



## Niels Schröter

Neue Materialien, in denen Elektronen exotische Verhaltensweisen zeigen, faszinieren Niels Schröter. Diese könnten sich für die Elektronik der Zukunft als nützlich erweisen – beispielsweise in Quantencomputern. Der Physiker sucht dafür nach Materialien mit besonderen Quasiteilchen, zum Beispiel Majorana-Fermionen. Und kürzlich entdeckten er und seine Kollegen in einem Kristall aus Aluminium- und Platin-Atomen erstmals Rarita-Schwinger-Fermionen. Diese Teilchen waren bislang nur theoretisch vorhergesagt worden – vor mehr als 75 Jahren.



Das Bandarchiv des CSCS: Der Roboter zwischen den Regalen kann auf jedes der 3600 Datenbänder zugreifen, auf denen die Daten von wichtigen Experimenten lagern.

# 5 000 000 000 000 000 Bytes von Villigen nach Lugano

Bei Untersuchungen winziger Strukturen mit den Grossforschungsanlagen des PSI fallen riesige Datenmengen an. Diese werden im Supercomputerzentrum CSCS in Lugano archiviert. Dort steht auch «Piz Daint» – diesen Supercomputer nutzen die Forschenden für ihre Simulationen und Modellierungen.

Text: Christina Bonanati



Zwischen den Daten: Leonardo Sala im Serverraum der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Hier werden die Daten zwischengespeichert, die an SLS und SwissFEL produziert werden.

Am Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL in Villigen strömt ein winziger Proteinkristall in einer Zahnpastaartigen Masse langsam aus einem Injektor. Ein Laser trifft ihn und löst Bewegungen im Molekül aus. Es verändert seine Struktur – etwa wie wenn eine Katze einen Buckel macht. Eine billionstel Sekunde später durchdringt ein Röntgenlichtpuls die Probe und trifft auf einen Detektor. Damit wird die Strukturänderung des Proteins quasi fotografisch festgehalten. Bei dem so abgelichteten Protein handelt es sich um lichtempfindliches Rhodopsin, das zum Beispiel in der Netzhaut des menschlichen Auges vorkommt. Dessen Strukturveränderung ist der Ausgangspunkt für die Übertragung von Lichtreizen zum Gehirn.

Im Versuchsaufbau treffen pro Sekunde 25 Röntgenlichtpulse auf die Proteinkristalle in der zähflüssigen Masse. Die Pulse dauern nur eine milliardstel Sekunde an und haben eine extrem hohe Dichte an Photonen. Das ermöglicht hochauflösende Bilder von molekularen Strukturen. Am Ende entsteht aus den vielen einzelnen Aufnahmen eine Art Daumenkino von den Bewegungen des Proteins. «Bei derlei präzisen Filmaufnahmen wächst der Datenberg gewaltig in die Höhe», so Leonardo Sala, Gruppenleiter des Bereichs High Performance Computing am PSI. So lieferten die Aufnahmen der

Rhodopsin-Proteinkristalle eine Rohdatenmenge von etwa 250 Terabyte. Das ist ungefähr das Tausendfache, das ein handelsüblicher Laptop an Speicherkapazität aufweist.

Nicht nur am SwissFEL, auch an anderen Grossforschungsanlagen wie der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS oder der Neutronenquelle SINQ führen Fortschritte in der Beschleuniger- und Detektortechnik zu Leistungssteigerungen, wodurch bei Experimenten immer mehr Daten erzeugt werden. So werden derzeit am PSI jährlich bis zu 5 Petabyte Daten produziert. Das entspricht in etwa der Speicherkapazität von einer Million DVDs.

#### Wohin mit den vielen Daten?

Für diese Datenmengen ist das Rechenzentrum des PSI nicht ausgelegt. Seit 2018 findet die Archivierung von Daten daher am Supercomputerzentrum Centro Svizzero di Calcolo Scientifico (CSCS) in Lugano statt. Das sogenannte Petabyte-Archiv wurde in enger Zusammenarbeit zwischen Kollegen von PSI und CSCS entwickelt. Computerexperten der beiden Einrichtungen arbeiteten eigens einen Managementprozess aus, mit dem digitale Informationen komprimiert, sicher übertragen, archiviert sowie wieder abgerufen und nach Ablauf

der mindestens 5-jährigen Archivierungszeit gelöscht werden können. Über ein Glasfaserkabel werden mit einer speziell entwickelten Netzwerkverbindung zwischen PSI und CSCS pro Sekunde 10 Gigabyte Daten übertragen.

Ein Ende der Datenflut ist nicht zu erwarten. Mit der Aufrüstung der SLS zur SLS 2.0 werden künftig noch sehr viel mehr Bits und Bytes produziert. «Wir arbeiten derzeit an einer Prozedur, um dieses Volumen zu reduzieren und komprimieren», sagt Sala. Spezielle Algorithmen sollen die Daten, die von den Detektoren kommen, sortieren, sodass nur noch die für die Forschungsarbeiten relevanten Informationen gespeichert werden. Sala erklärt, weshalb das sinnvoll ist: «Bei der Messung der Proteine an der SLS treffen weniger als 20 Prozent der Röntgenpulse ein Protein und produzieren ein brauchbares Bild.» Die Signale, die kein Ergebnis liefern, müssen also nicht aufwendig gespeichert werden.

Was sich so einfach anhört, ist in der Realität eine gewaltige Herausforderung. «Einem Computer beizubringen, welche Messungen unbrauchbar sind, ist sehr schwierig», räumt denn auch Sala ein. Doch das ist nur der erste Schritt zur Eindämmung der Datenschwemme. Nach dem automatisierten Aus-sortieren können die IT-Spezialisten das Datenvolumen um den Faktor zehn verringern, indem sie nicht Rohdaten, sondern die zur Endnutzung aufbereiteten Informationen abspeichern.

### **Von Villigen den Roboter in Lugano aktivieren**

Am CSCS in Lugano finden sich die Ergebnisse der Messungen der Proteinforschungsgruppe schliesslich in einer sogenannten Bandbibliothek wieder. Eingelagert in einem Regal befinden sich etwa 3600 Datenbänder, bei denen es sich um ähnliche Magnetbänder handelt, wie man sie vor Jahrzehnten noch für Videokassetten benutzte. «Zu Anfang stehen uns in der Bandbibliothek 10 Petabyte Speicher zur Verfügung. Der grosse Vorteil an der Zusammenarbeit mit dem CSCS ist, dass wir das bei Bedarf beliebig aufrüsten können», so Sala. Bis 2022 plant das PSI, rund 85 Petabyte zur Archivierung an das CSCS zu übertragen.

Daten zu speichern, ist die eine Sache, sie wieder aus dem Archiv herauszuholen, eine völlig andere. Deshalb listet ein speziell dafür eingerichteter Katalog auf, wo sich welche Informationen befinden. Bei Bedarf stöbern Forschende einfach in diesem Katalog und aktivieren von Villigen aus einen Roboter, der die passenden Bänder heraussucht, in ein Laufwerk eines Computers steckt und das Versenden zum PSI auslöst. Die Zusammenarbeit mit dem CSCS geht jedoch über die reine Archivierung von Forschungsergebnissen hinaus. «Den Supercom-

puter am CSCS nutzen wir schon seit 15 Jahren», so Andreas Adelman, Leiter des Labors für Simulationen und Modellierung am PSI. Denn für Simulationen und Modellierungen von Grossforschungsanlagen und Experimenten, zum Beispiel in den Material- und Biowissenschaften, benötigen die Forschenden enorm hohe Rechenleistungen. Diese finden sie am «Piz Daint» des CSCS, einem der leistungsfähigsten Supercomputer der Welt. Schaffte 1941 der erste in der Praxis einsetzbare, frei programmierbare Rechner, die "Z3", knapp zwei Additionen pro Sekunde, so beträgt die Rechenleistung des «Piz Daint» heute 25 000 Petaflop in der Sekunde. Das sind 25 Milliarden Rechenoperationen, 14 000-mal schneller als eine Grafikkarte der PlayStation 4.

Prinzipiell wird in der PSI-Forschung für fast alles Modellierung und Simulation benötigt, sei es, um zu verstehen, wie sich etwa Risse in Materialien fortpflanzen oder um Komponenten von Brennstoffzellen zu erforschen.

Teilchenbeschleuniger wie das Zyklotron zur Protonenbeschleunigung, die SLS oder der SwissFEL werden mithilfe von Simulationen nicht nur neu konstruiert, sondern auch weiterentwickelt und optimiert. Zudem können die Forschenden berechnen, wie ein Experiment wahrscheinlich verlaufen wird, um so mögliche Probleme in der Versuchsanordnung zu erkennen.

Und es gibt noch einen weiteren Grund, warum man gerne und mit gutem Gewissen seine Daten für die Berechnungen und Archivierung nach Lugano schickt: «PIZ Daint» ist seit 2013 der günstigste und energieeffizienteste Petaflop-Supercomputer der Welt, denn für dessen Kühlung verbrauchen keine energieintensiven Klimaanlage Strom. Dass die elektronischen Superhirne des CSCS nicht heiss laufen, verhindert das Wasser des Luganersees. Aus 45 Meter Tiefe wird etwa 6 Grad kaltes Nass entnommen und nach der Nutzung in eine Tiefe von 12 Meter zurückgeführt. Dabei wird die durch den Höhenunterschied entstehende, potenzielle Energie des Wassers mithilfe von Turbinen auch noch für Stromerzeugung genutzt. ♦

**«Zu Anfang stehen uns in der  
Bandbibliothek 10 Petabyte Speicher  
zur Verfügung. Bei Bedarf  
können wir das beliebig aufrüsten.»**

Leonardo Sala, Gruppenleiter des Bereichs  
High Performance Computing am PSI

# Aktuelles aus der PSI-Forschung

## 1 Das Energiesystem der Zukunft

Das Projekt ReMaP, eine Forschungs-kooperation des PSI, der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa und der ETH Zürich, ist gestartet. Damit werden die Forschungs- und Entwicklungsplattformen NEST, move und ehub der Empa mit der Forschungs- und Entwicklungsplattform ESI des PSI vernetzt. Mit Letzterer soll beispielsweise ein Algorithmus, also letztlich ein Computerprogramm, entwickelt werden, das Energieverbrauch und -gewinnung miteinander abgleicht und Schwankungen automatisch ausgleicht. Dabei wird mit Solarmodulen gewonnene Energie mittels Elektrolyse in Wasserstoff zwischengespeichert und über eine Brennstoffzelle später wieder in Strom umgewandelt, wenn ein entsprechender Bedarf auftritt.

Weitere Informationen:  
<http://psi.ch/node/28856>



Am 20. Juni 2019 fand der **104.** Start einer Ariane-5-Rakete statt.

Diese Mission brachte **2** Kommunikationssatelliten erfolgreich in die Erdumlaufbahn.

**10 594** Kilogramm betrug das Gesamtgewicht der Nutzlast dieser Mission.

## 2 PSI-Bildgebung hilft bei Raketenstarts

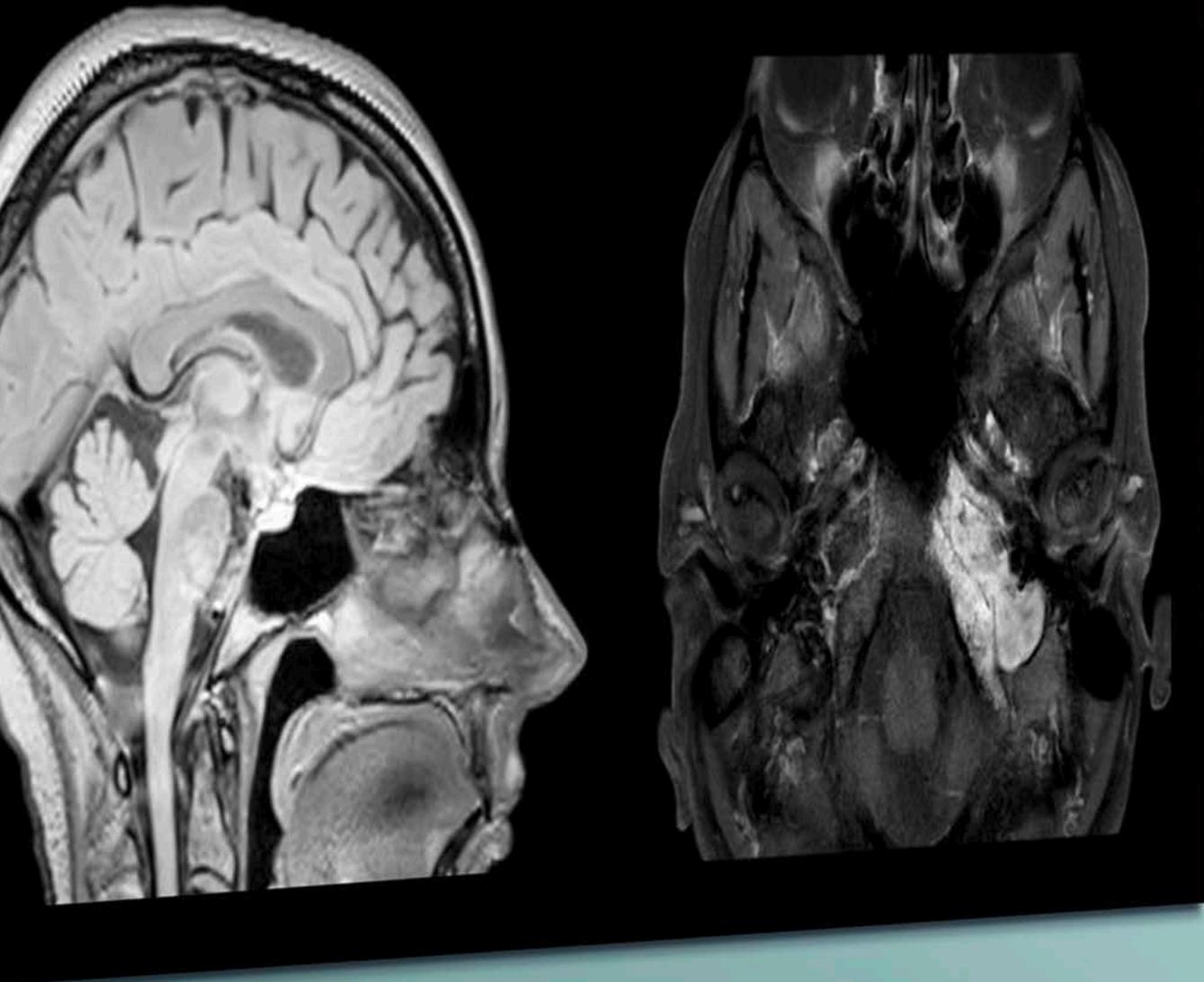
Raketen der Europäischen Weltraumorganisation ESA fliegen mit Unterstützung des Paul Scherrer Instituts PSI ins Weltall. In Kooperation mit dem Unternehmen Dassault Aviation durchleuchten PSI-Forschende an der Neutronenquelle SINQ des PSI sogenannte pyrotechnische Bauteile, die später in Trägerraketen vom Typ Ariane 5 sowie Vega eingebaut werden. Die Neutronen-Bildgebung des PSI dient dabei der Qualitätssicherung dieser Komponenten. Die pyrotechnischen Bauteile fungieren beim Raketenstart als Zündschnüre oder Zündkörper und sorgen unter anderem dafür, dass innerhalb der richtigen hundertstel Sekunde die Boosterraketen abgeworfen werden. Beispielsweise wurden am 20. Juni 2019 Satelliten in die Umlaufbahn der Erde gebracht – mit einer Ariane-Rakete, deren pyrotechnische Komponenten zuvor am PSI durchleuchtet worden waren.

Weitere Informationen:  
<https://www.psi.ch/node/28979>

## 3 Molekulare Schere stabilisiert Zell-Skelett

Forschende des Paul Scherrer Instituts PSI in Villigen haben erstmals die Struktur wichtiger Enzyme in menschlichen Zellen aufgeklärt, die wesentliche Bausteine des Zell-Zytoskeletts verändern. Es handelt sich dabei um die sogenannten Vasohibine. Damit ist der noch fehlende Teil des Kreislaufs aufgedeckt, der den Auf- oder Abbau von Stützelementen der Zelle regelt. Die untersuchten Enzyme wirken als molekulare Schere. Sie schneiden einen kleinen Teil vom Zell-Zytoskelett ab. Das stabilisiert das Skelett über das übliche Mass hinaus, was wiederum eine normale Zellentwicklung behindern und beispielsweise Krankheiten des Nervensystems verursachen kann. Die strukturelle Aufklärung der Vasohibine bietet nun neue Möglichkeiten für die Entwicklung spezifischer Hemmstoffe. Diese liessen sich dann für medizinische Therapien nutzen.

Weitere Informationen:  
<http://psi.ch/node/29057>

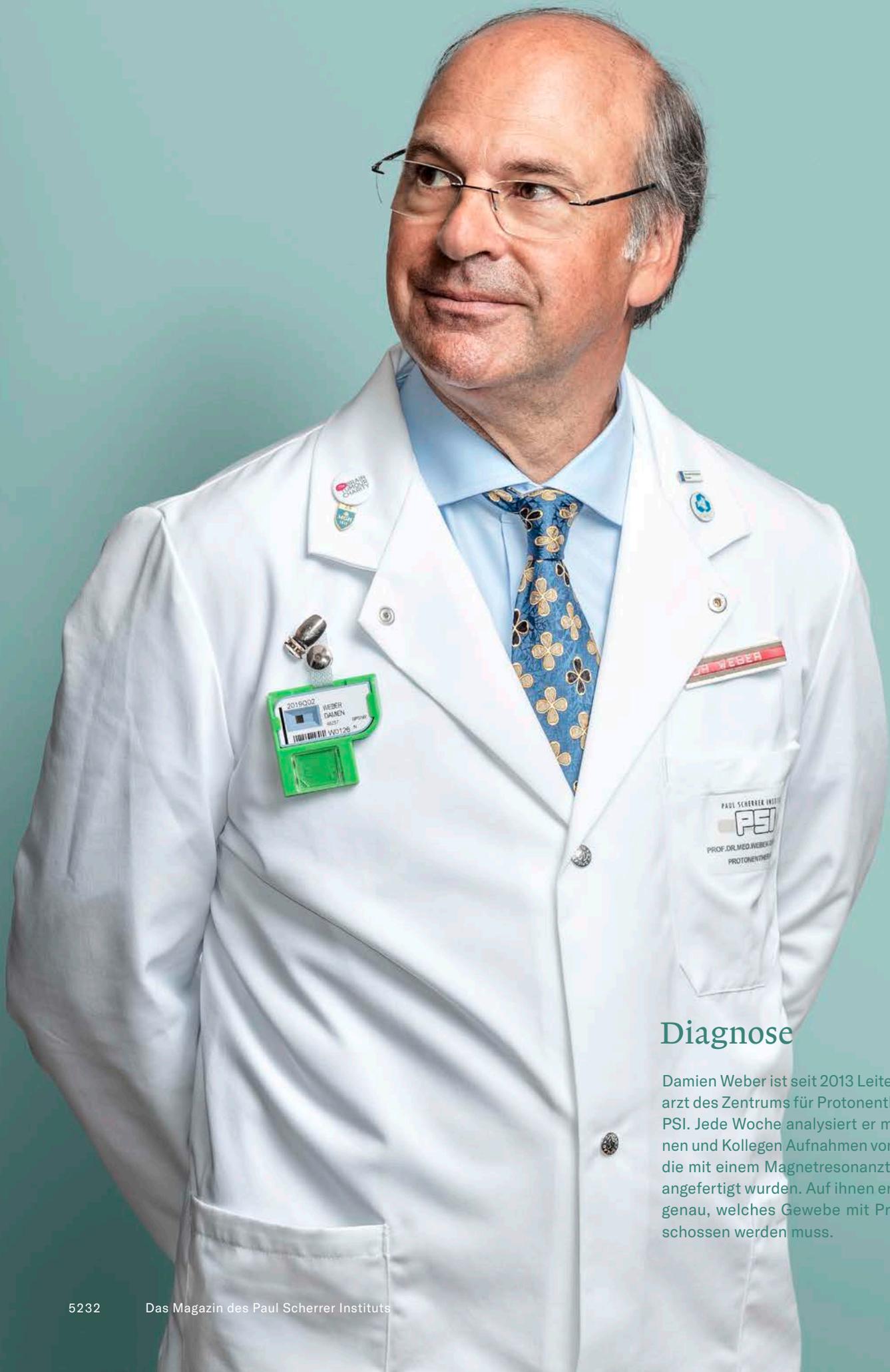


# Hand in Hand für die Gesundheit

GALERIE

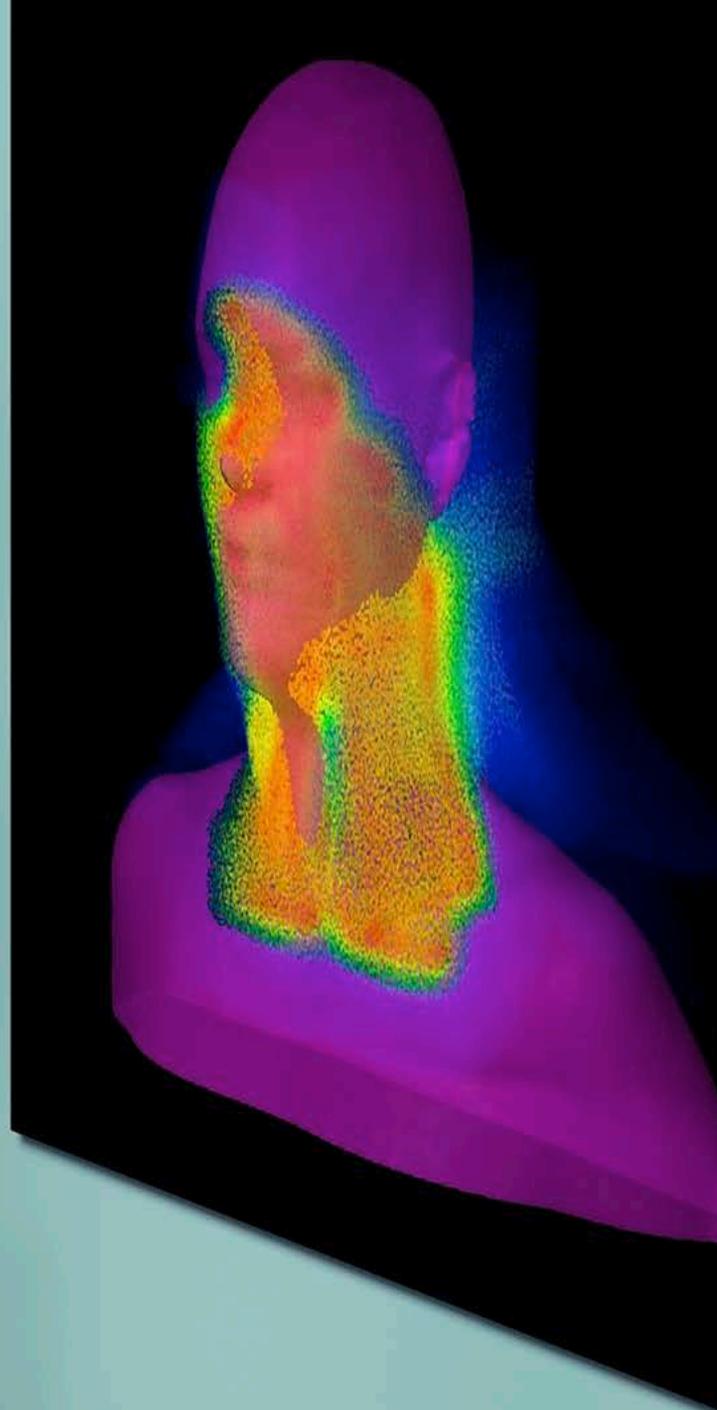
Für einen optimalen Verlauf der Protonentherapie braucht es viele verschiedene Spezialisten. Mediziner für die Diagnose, Dosimetristen für die Therapieplanung, Medizinisch-technische Radiologie-Fachpersonen für die Betreuung der Patienten während der Therapie und Überwachung des korrekten Ablaufs der Bestrahlung, Physiker für den Betrieb der Anlagen und Forschende, die die Therapie weiterentwickeln. Sie alle arbeiten zusammen für die Gesundheit der Patienten.

Text: Sebastian Jutzi



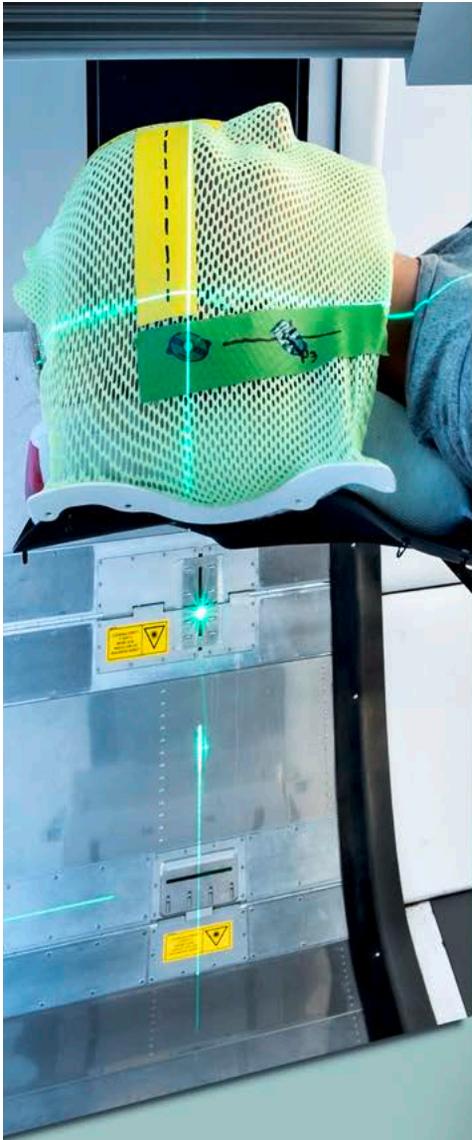
## Diagnose

Damien Weber ist seit 2013 Leiter und Chef-  
arzt des Zentrums für Protonentherapie am  
PSI. Jede Woche analysiert er mit Kollegin-  
nen und Kollegen Aufnahmen von Patient-  
en, die mit einem Magnetresonanztomogra-  
fen angefertigt wurden. Auf ihnen erkennt man  
genau, welches Gewebe mit Protonen be-  
schossen werden muss.



## Therapieplanung

Dosimetrist Nicola Bizzocchi plant die Therapie für jeden Patienten ganz individuell. Dazu teilt er mithilfe eines speziellen Computerprogramms den Tumor in verschiedene Zonen ein. Jede dieser Zonen wird präzise mit einer eigens für sie definierten Intensität bestrahlt. Das minimiert mögliche Nebenwirkungen der Behandlung und garantiert einen bestmöglichen Erfolg der Therapie.



## Therapie

Olga Jose ist Medizinisch-technische Radiologie-Fachfrau und stellvertretende Leiterin der Gruppe der Radiologie-Fachpersonen. Sie macht die Qualitätskontrolle am Bestrahlungsgerät und führt die Behandlung durch. So positioniert sie die Liege mit dem Patienten in der richtigen Ausgangsstellung und achtet darauf, dass die Bestrahlung reibungslos abläuft und sich die Patienten – soweit als möglich – wohlfühlen.



## Betrieb

Das Revier von Betriebsphysikerin Zema Chowdhuri liegt hinter den Kulissen der Behandlungsräume und erstreckt sich vom Protonenbeschleuniger COMET über die Strahllinie, durch die die Protonen zur Behandlungsstation flitzen, bis in die Gantry, dem eigentlichen Behandlungsraum. Sie stellt den einwandfreien Betrieb der Anlagen sicher, mit deren Hilfe die Protonen exakt gelenkt und dosiert werden.



## Forschung

Physiker David Meer forscht, um die Protonentherapie weiter zu verbessern und noch präziser zu machen. So untersucht er beispielsweise mithilfe eines menschlichen Phantoms, wie sich die Behandlung von Tumoren im Brust- und Bauchraum optimieren lässt. Dort sind Tumore besonders schwer exakt zu treffen, weil das Gewebe durch die Atmung ständig in Bewegung ist; auch das Herz schlägt permanent.

# Er macht seine Träume wahr

Am PSI baute Philippe Stutz unter anderem Spinnrotatoren für Experimente am Protonenbeschleuniger oder zeichnete Pläne für eine 20-Tonnen-Betonbrücke. Heute fertigt er als Goldschmied in Luzern Hochzeitsringe und andere wertvolle Schmuckstücke.

Text: Joel Bedetti

Es gibt Menschen, die einen Raum betreten und jeden darin mit ihrer positiven Energie anstecken. Philippe Stutz ist so einer. Wenn der Innerschweizer Hüne mit sanfter Stimme sein Goldschmiedeatelier am Schwanenplatz Nummer 4 betritt, strömt seine gute Laune durch den elegant möblierten und schwarz gestrichenen Verkaufsraum in die angrenzende Werkstatt, wo gerade drei seiner sechs Angestellten arbeiten und ihn mit grossem Hallo empfangen.

Wie ein Wirbelwind führt Stutz den Besuch durch sein Reich. Begeistert bleibt er vor der neu erstandenen Occasion-Walzmaschine stehen, ein hüfthohes, metallgrünes Gerät mit Kurbel zum manuellen Plattwalzen von Gold. «Gute alte Qualität», betont Stutz und springt zurück in den Verkaufsraum, wo er über den Holztisch streicht, an dem er Kunden seine Schmuckmodelle präsentiert. «Den habe ich mit meinen Angestellten selbst gezimmert», erzählt Stutz und hält bereits eine Kinderhalskette hoch, Spezialität des Hauses und Schmucktrend seit den 90er-Jahren. «Sieh mal, diesen schlichten Stern als Anhänger kann man auch als junger Mann noch tragen», ist er überzeugt. Zuletzt steht Stutz, der sich eine kindliche Freude bewahrt hat, wieder im Eingang und ahmt mit geweiteten Augen und offenem Mund das Kind eines Kunden nach, das die Spielecke mit altem Schulpult, Malstiften und Holzklötzen entdeckt. «Auch sie sollen sich wohlfühlen», sagt er. «Es darf auch mal laut sein hier drin.»

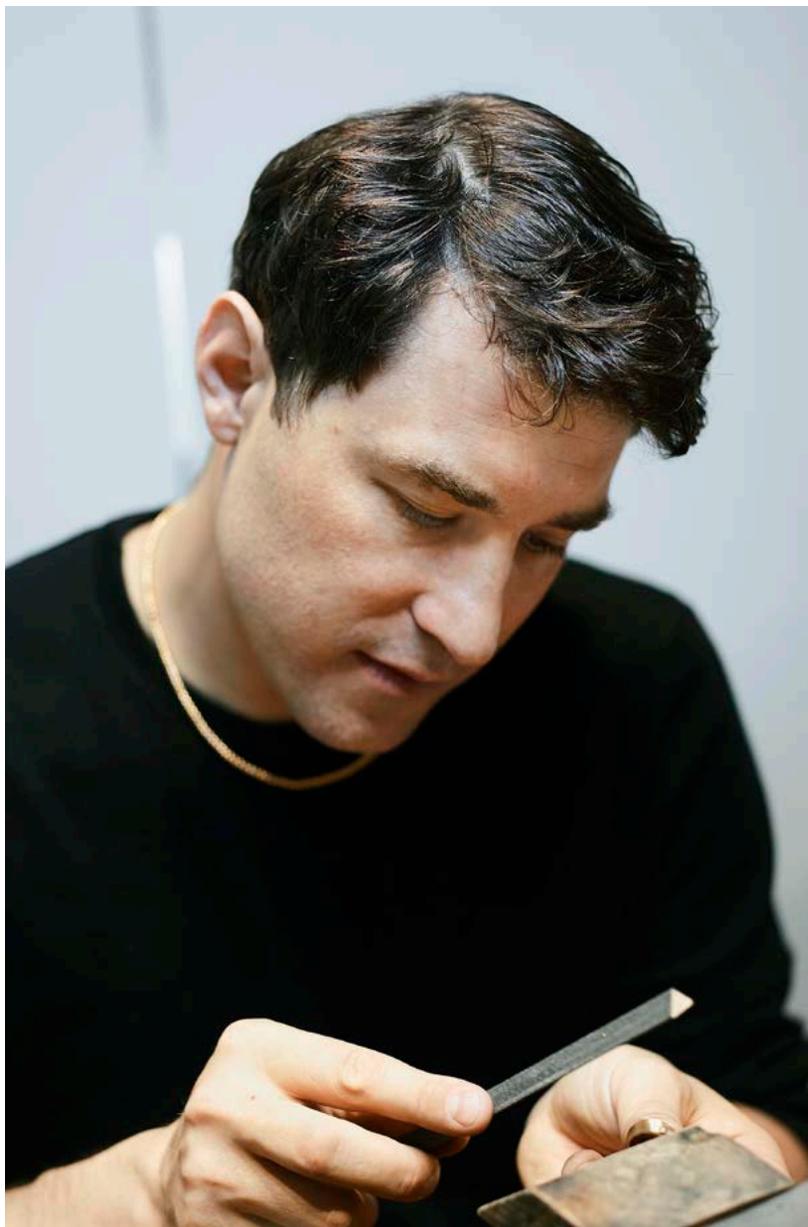
Schnell wird klar: Philippe Stutz sprudelt nicht nur vor Ideen, er verwirklicht sie auch. So schnell es geht, selbst wenn sie radikal sind. Nur so lässt sich die Wende erklären, die der 39-Jährige seinem Leben vor sieben Jahren gab. Fast von einem Tag auf

den andern kündigte Stutz seinen geliebten Job als Techniker am Protonenbeschleuniger des Paul Scherrer Instituts, um Goldschmied zu werden.

Ereignisreich war das Leben von Philippe Stutz immer. Als er vier Jahre alt war, trennten sich seine Eltern. Stutz wuchs bei der Mutter, einer Filzmacherin, im Luzernischen auf. Sie gab ihm das Interesse am Handwerk mit. Nach der Lehre als Mechaniker montierte und entwarf er einige Jahre lang Anlagen bei seinem Vater in der Firma, die Gummigranulat für Sportplätze produziert. Von ihm, sagt Stutz, habe er das Unternehmerische. Als er, Ende zwanzig, wieder mit seiner Jugendliebe Jasmin zusammenkam, zog er in ihren Studienort Lausanne und fand dort einen Job in der Versuchswerkstatt eines Zahnradherstellers. «Wir machten einen Ausflug ans CERN», erinnert sich Stutz, «und ich dachte: In so einer riesigen Forschungsanlage will ich auch einmal arbeiten.»

Wenige Monate später ging der Wunsch in Erfüllung. Jasmin nahm eine Stelle am Universitätsspital Zürich an, Stutz sah sich nach einem Job in der Region um. Von einem Freund, der an der ETHZ und am PSI doktorierte, hörte er, dass ein Techniker für den grossen Protonenbeschleuniger gesucht wurde. Stutz bewarb sich und erhielt den Zuschlag. Als Mitglied eines vierköpfigen Teams war er nun für Betrieb und Unterhalt des ringförmigen Beschleunigers mit einem Umfang von rund 48 Metern zuständig, in dem Protonen mit etwa 80% der Lichtgeschwindigkeit kreisen. In der riesigen Halle der Anlage installierte er mit seinen Kollegen Geräte für Experimente oder skizzierte neue Bauteile, etwa für eine mehr als 20 Tonnen schwere Betonbrücke über einer Experimentierstation. «Am PSI durfte ich schnell viel Verantwortung übernehmen», erzählt er.





«Am PSI durfte ich schnell Verantwortung übernehmen und arbeitete unter anderem am grossen Protonenbeschleuniger.»

Philippe Stutz, Schmuckdesigner in Luzern

### Drei Wochen im Eigenheim

Sein ehemaliger Teamkollege Thomas Rauber erinnert sich, wie Stutz im personalschwachen Sommer einen komplexen Spinnrotator zusammenbaute – praktisch in Eigenregie. Stutz ist ihm aber nicht nur aufgrund des technischen Geschicks in Erinnerung geblieben. «Er brachte Leben in die Bude», sagt Rauber. Stutz organisierte ein halbjährliches PSI-Fest namens «Grundlos glücklich», engagierte sich in der Betriebssanität und trug als Präsident des PSI-Sportclubs dem damaligen PSI-Direktor Joël Mesot die Idee einer Sporthalle mit Kletterwand vor, die ihm und einigen Gleichgesinnten vorschwebte.

Eine besonders enge Freundschaft baute Stutz zu seinem Arbeitskollegen Davide Reggiani auf. 2012 zogen sie in ein gemeinsames Eigenheim, an dessen Ausgestaltung sie mit ihren Partnerinnen gefeilt hatten. Doch drei Wochen nach dem Einzug kamen Philippe Stutz und seine Partnerin rüber und teilten den verdutzten Freunden mit, dass sie wieder ausziehen würden. «Eine der schwierigsten Entscheidungen meines Lebens», sagt Stutz heute. Was war passiert?

Eine Woche zuvor hatte sich ihm Jasmins Vater offenbart: Der leidenschaftliche Goldschmied suchte einen Nachfolger für sein Geschäft, bestehend aus einem Goldatelier und einer kleinen Dependence für Silberschmuck, in Luzern. Doch die Interessenten wollten daraus eine Bijouterie machen, also nur handeln und wenig Handwerk betreiben. Philippe Stutz überlegte eine Woche lang, besprach sich mit Jasmin, dann entschieden sie sich für den neuen Weg.

Stutz kündigte beim PSI und zog mit Jasmin in eine WG in Luzern, um bei ihrem Vater in die Lehre zu gehen. Die Umstellung war nicht einfach für den damals 32-Jährigen. «Am PSI duzte ich Leute mit zwei Dokortiteln», erzählt er, «in der Berufsschule musste ich die Lehrer wieder siezen.» Doch nicht nur die Umgangsformen trennten die beiden Welten. «Viele Goldschmiede blicken nicht über ihren Werktschrand hinaus», sagt Stutz. Wer ein CAD-Zeichnungsprogramm verwende, gelte als innovativ. Stutz hingegen hatte am PSI schon mit 3-D-Druckern Kontakt – und kam so auf neue Ideen. Kunden sollten ihre Schmuckstücke mit Ton selbst entwerfen. Er würde diese Vorlagen dann einscannen.

### Nie stehen bleiben

Mit der Umsetzung dieser Idee begann die Übergabe: Stutz, inzwischen mit Jasmin verheiratet, verwandelte das Silberatelier, das nur einen Steinwurf

vom Hauptgeschäft entfernt liegt, in ein Kreativatelier mit Kronleuchter und Vorhängen. Heute modellieren in der «Schmuckmacherei» Kunden bei einem guten Tropfen ihre Tonkreationen, die Stutz danach digitalisiert und verfeinert. Aber auch das Comic-Festival Fumetto stellte in dem Raum schon aus. Anfang 2018 übernahm Stutz dann auch das Goldatelier. Dessen Kernprodukte, Hochzeitsringe und Kinderschmuck, behielt er bei. Das Interieur dagegen nicht. Stutz strich die Wände des Verkaufsrums schwarz, drapierte Schmuckstücke im Schaufenster auf Baumscheiben, liess einen Fotografen ein Schwarz-Weiss-Alpenpanorama mit Blattgold überziehen, das nun als Blickfang neben dem Eingang hängt.

Im Gegensatz zum aufgeräumten Verkaufsraum regiert in der Werkstatt kreative Unordnung: Werkzeuge, Topfpflanzen und die Comic-Puppe des Basketballers Paul George auf alten Werkbänken. Die sind jung besetzt: Die Goldschmiede Enrico und Lucia besuchten mit Stutz die Berufsschule. Lehrtochter Nora, studierte Sportwissenschaftlerin, ist mit 26 Jahren die Jüngste. Nur die Goldschmiedin Iris Chang ist von der alten Belegschaft geblieben. Stutz hat nicht nur die Einrichtung modernisiert, sondern auch das Betriebsklima. Gearbeitet wird konzentriert, es wird aber auch gefeiert und gelacht. War der Schwiegervater Patron alter Schule, setzt Stutz auf Mitverantwortung. Absenzen und Weiterbildungen organisiert das Team selbst, Lucia ist gerade von einem wöchigen Fassungskurs zurück. «Ich animiere meine Mitarbeiter dazu», erklärt Stutz. «Am PSI habe ich gelernt, nie stehen zu bleiben.»

Doch die entspannte Atmosphäre täuscht leicht über die – im Vergleich zur PSI-Anstellung – unsichere Existenz als Gewerbler hinweg. Die Margen sind niedrig, die Mieten in der Altstadt steigen. Trotzdem lächelt Stutz, als er nach dem Mittagessen im Quartierrestaurant inmitten eines Pulks Touristen Fotos von sich im PSI zeigt. Er trägt Bart darauf – und ein paar Kilos mehr an den Hüften. «Es ist seltsam», sagt Stutz, der im Herbst zum zweiten Mal Vater wird, «aber ich fühle mich heute jünger als damals.» Auch wenn die Zeit am PSI grossartig war, sei er vielleicht nicht für so eine grosse Institution gemacht, meint er. «Hier, in meinem eigenen, kleinen Betrieb kann ich Dinge schneller verändern.»

Die Brücken nach Villigen sind aber keineswegs abgebrochen. Ehemalige Arbeitskollegen haben das Atelier schon besucht. Am PSI selbst hat er nicht nur Erinnerungen, sondern inzwischen auch ein ganz spezielles Erbe aus Beton hinterlassen. Die Sporthalle, die Stutz einst vorschwebte, wurde schliesslich gebaut und vergangenes Jahr eröffnet. ♦

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





Paul Scherrer Institut  
5232 Villigen PSI, Schweiz

4

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

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 352 643 Quadratmeter erstreckt, eine eigene Brücke über die Aare besitzt und mit 2000 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

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

Insgesamt unterhält das PSI vier 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 3/2019 (September 2019)  
ISSN 2504-2262

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

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

**Design und Art Direction**  
Studio HübnerBraun

**Fotos**  
Scanderbeg Sauer Photography, ausser:  
Seiten 22/23: CSCS;  
Seiten 26/27: ESA/CNES/ARIANE-SPACE – Service Optique CSG;  
Seiten 28/30/32 (Bild im Bild): Paul Scherrer Institut;  
Seiten 35/36: Herbert Zimmermann;  
Seite 38: Paul Scherrer Institut/Markus Fischer;  
Seite 41: shutterstock.

**Grafiken**  
Studio HübnerBraun, ausser:  
Cover, Seiten 2, 3, 9, 10, 12, 14, 16–18, 20: Aurel Märki;  
Seiten 6/7: Daniela Leitner.

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

**Im Internet finden Sie 5232 unter**  
[www.psi.ch/5232/magazin-5232](http://www.psi.ch/5232/magazin-5232)

**Sie können das Magazin kostenlos abonnieren unter**  
[www.psi.ch/5232/5232-abonnieren](http://www.psi.ch/5232/5232-abonnieren)

**5232 ist auch auf Französisch erhältlich**  
[www.psi.ch/5232/le-magazine-5232](http://www.psi.ch/5232/le-magazine-5232)

PAUL SCHERRER INSTITUT  




## Das erwartet Sie in der nächsten Ausgabe

Mehr als 6 Millionen Motorfahrzeuge waren im Jahr 2018 in der Schweiz gemeldet. Jedes Jahr kommen netto um die 100 000 Fahrzeuge hinzu. Wie gestalten wir die zunehmende Mobilität nachhaltig? Was ist die Ausgangslage – welcher heutige Fahrzeugtyp hat auf den gesamten Lebenszyklus gerechnet welche Umweltauswirkungen? Eine gross angelegte PSI-Studie ist genau dieser Frage nachgegangen. Andere PSI-Forschende tüfteln an besseren Katalysatoren, an Batterien für Elektroautos, an neuen Techniken für eine nachhaltige Stromproduktion und an Brennstoffzellen, damit Pkws fit für die Zukunft werden. Wir stellen in der kommenden Ausgabe die Forschung für die Mobilität der Zukunft vor.



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

---