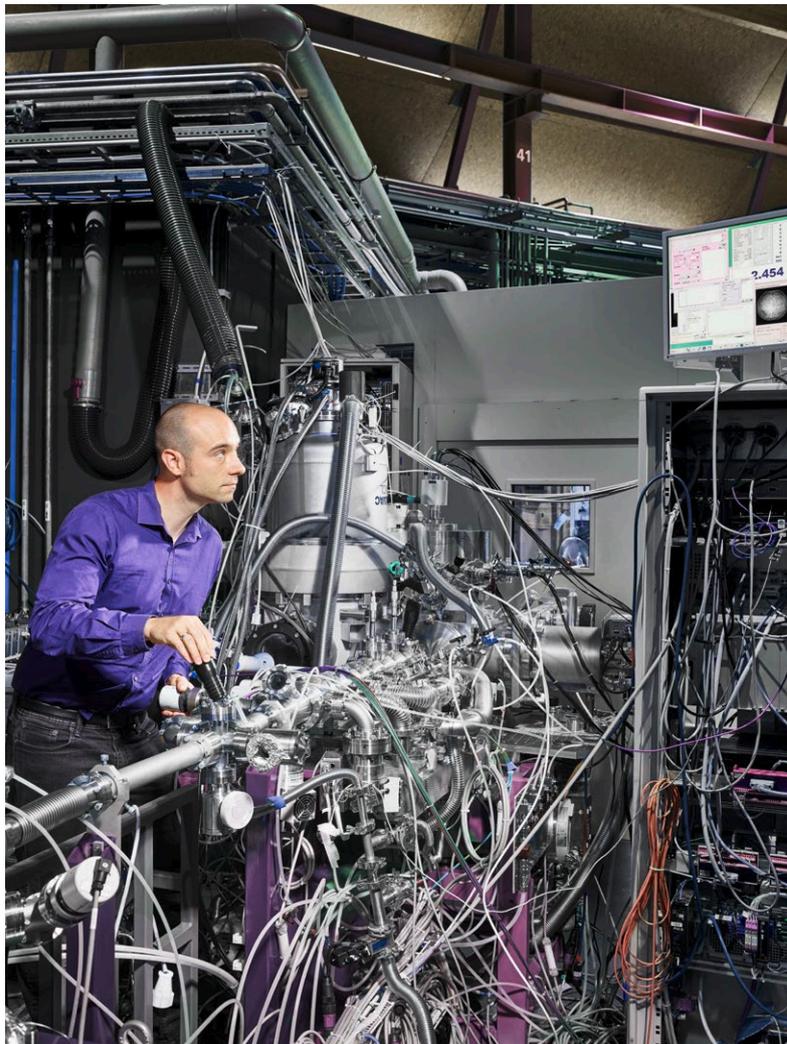


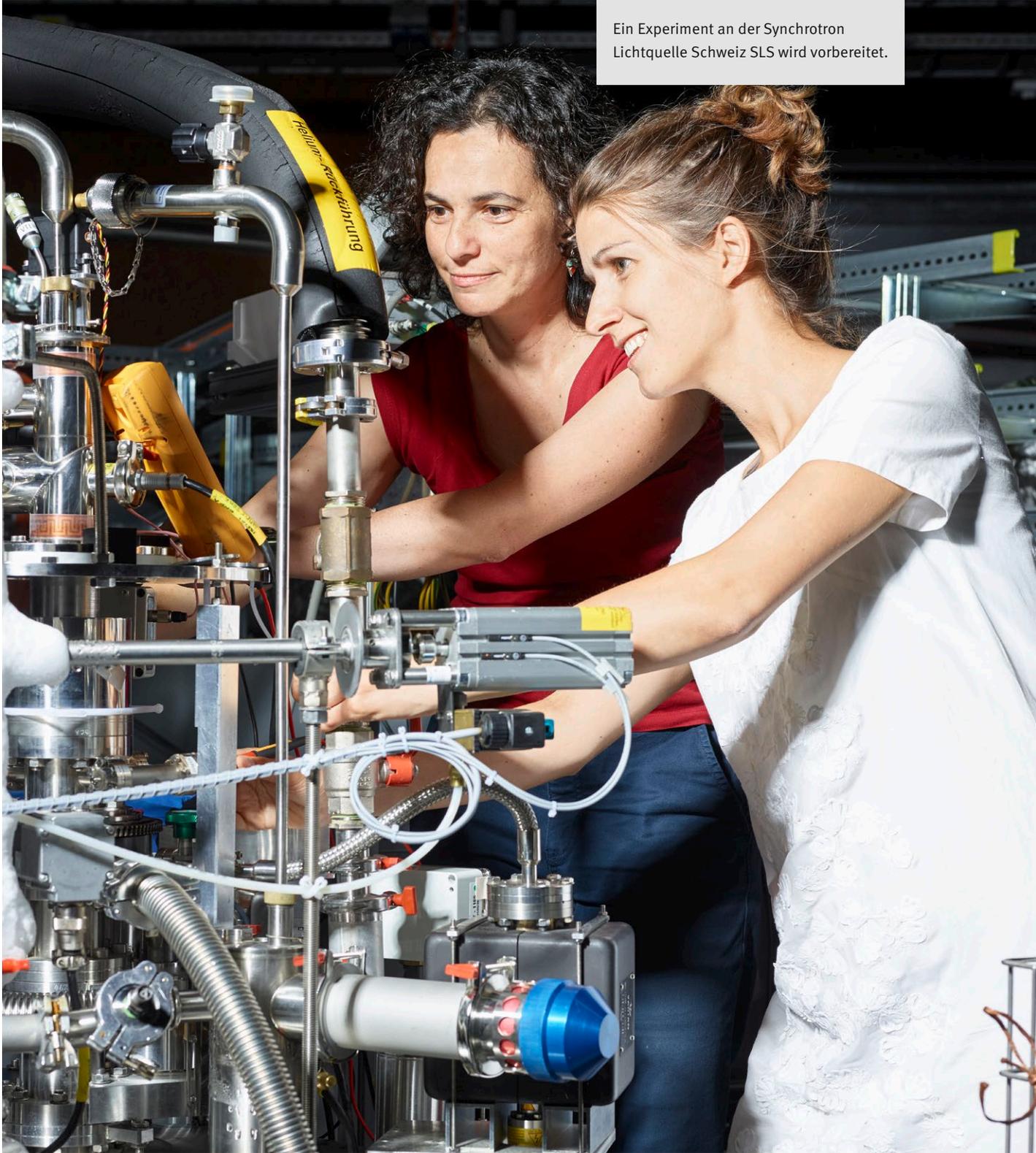
PAUL SCHERRER INSTITUT



# Einblicke mit Licht

Forschung am Paul Scherrer Institut

Ein Experiment an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS wird vorbereitet.



# Inhalt

- 4 90 Sekunden über Forschung mit Licht
- 6 Strukturen des Lebens
  - 6 Tumorwachstum stoppen
  - 7 Blind bei Nacht
  - 7 Nobelpreis
- 8 Mensch und Gesundheit
  - 8 Hirnforschung
  - 8 Makellose Zähne
- 10 Material- und Ingenieurwissenschaften
  - 10 Kohlenstofffasern
  - 10 Feuerschutz
  - 11 Rekordverdächtige Computerchips
- 12 Magnete manipulieren
  - 12 Ein Atom, ein Speicherbit
  - 13 Lichtschalter für Magnete
  - 13 Nano-Magnete
- 14 Quantenmaterie
  - 14 Orbitonen auf der Spur
  - 15 Supraleiter verstehen
- 16 Energie und Umwelt
  - 16 Gas aus Holz
  - 17 Bessere Batterien
  - 17 Korrosionsschutz für Schiffe
- 18 Industrie und Innovation
  - 18 Investitionen für Innovationen
  - 18 Problemlösungen für die Industrie
  - 18 Neue Technologien entwickeln
  - 19 Spin-off-Unternehmen
- 20 Im Inneren der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS
- 22 Materie und Licht
  - 22 Atome sind überall
  - 22 Überall ist Licht
  - 23 Licht für Experimente
- 24 Das besondere Licht der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS
  - 25 Extrem schnelle Elektronen
  - 25 Elektronen und Licht
  - 25 Immer heller
- 26 SwissFEL – der Freie-Elektronen-Röntgenlaser am PSI
  - 26 Was ist ein Freie-Elektronen-Röntgenlaser?
  - 26 An der Spitze der Forschung
  - 26 Weltweite Zusammenarbeit
  - 27 Von Diamanten geformt
- 28 Wir machen's möglich
- 31 Das PSI in Kürze
  - 31 Impressum
  - 31 Kontakte

## Titelbild

Mithilfe von extrem hellem Röntgenlicht und ultraviolettem Licht, die in der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS erzeugt werden, erhalten Forschende einen einzigartigen Blick in eine Welt, deren Objekte eine Million Mal kleiner sind als ein Sandkorn. Sie können so bestimmen, wie Atome und Moleküle miteinander verbunden sind oder in Echtzeit beobachten wie sie sich verändern.

# 90 Sekunden über Forschung mit Licht

**Die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS am Paul Scherrer Institut PSI ist eine Art Super-Mikroskop. Hier lassen sich winzige Strukturen abbilden, die eine Million Mal kleiner sind als ein Sandkorn.**

**Die SLS erzeugt extrem helle und gebündelte Strahlen aus Röntgenlicht und ultraviolettem Licht. Mit ihnen wird das Innenleben verschiedenster Objekte und Gebilde sichtbar. Die hohe Auflösung reicht bis in die Welt der Atome und Moleküle: An der SLS lässt sich ergründen, wie die Bausteine der Materie angeordnet sind und wie sie sich bewegen.**

Seit über 100 Jahren nutzen Mediziner Röntgenlicht, um ins Innere des menschlichen Körpers zu blicken. Ob es um gebrochene Knochen, Tumoren oder löchrige Zähne geht – Ärzte und Ärztinnen verschiedenster Fachrichtungen kommen heute nicht mehr ohne Röntgenapparate aus.

Doch diese Apparate haben wenig zu tun mit den Röntgenanlagen, die in der aktuellen Forschung der Natur- und Ingenieurwissenschaften eingesetzt werden und deutlich intensiveres Röntgenlicht liefern. Die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS ist eine solche Anlage.

Das hier erzeugte Röntgenlicht ist eine Milliarde Mal heller als dasjenige an Krankenhaus-Röntgenapparaten und hat zudem einzigartige Eigenschaften. Mit ihm lassen sich innerhalb von nur wenigen Sekunden tausende hochpräzise und detaillierte Messungen durchführen.

Zusätzlich wurde im Jahr 2016 eine weitere neue Röntgenlichtquelle am Paul Scherrer Institut PSI in Betrieb gesetzt: Der SwissFEL – der Schweizer Freie-Elektronen-Röntgenlaser. Er ist komplementär zur SLS angelegt und wird es möglich machen, Vorgänge zu untersuchen, die für bisherige Untersuchungsmethoden zu schnell sind.

Das PSI beherbergt zwei weitere Grossforschungsanlagen: Die Schweizer Spaltungs-Neutronenquelle SINQ sowie die Schweizer Myonenquelle  $\mu\text{S}$ . Jedes Jahr reisen mehr als 2500 Forschende aus der Schweiz und der ganzen Welt ans PSI, um die hier angesiedelte Forschungsinfrastruktur von Weltrang zu nutzen.

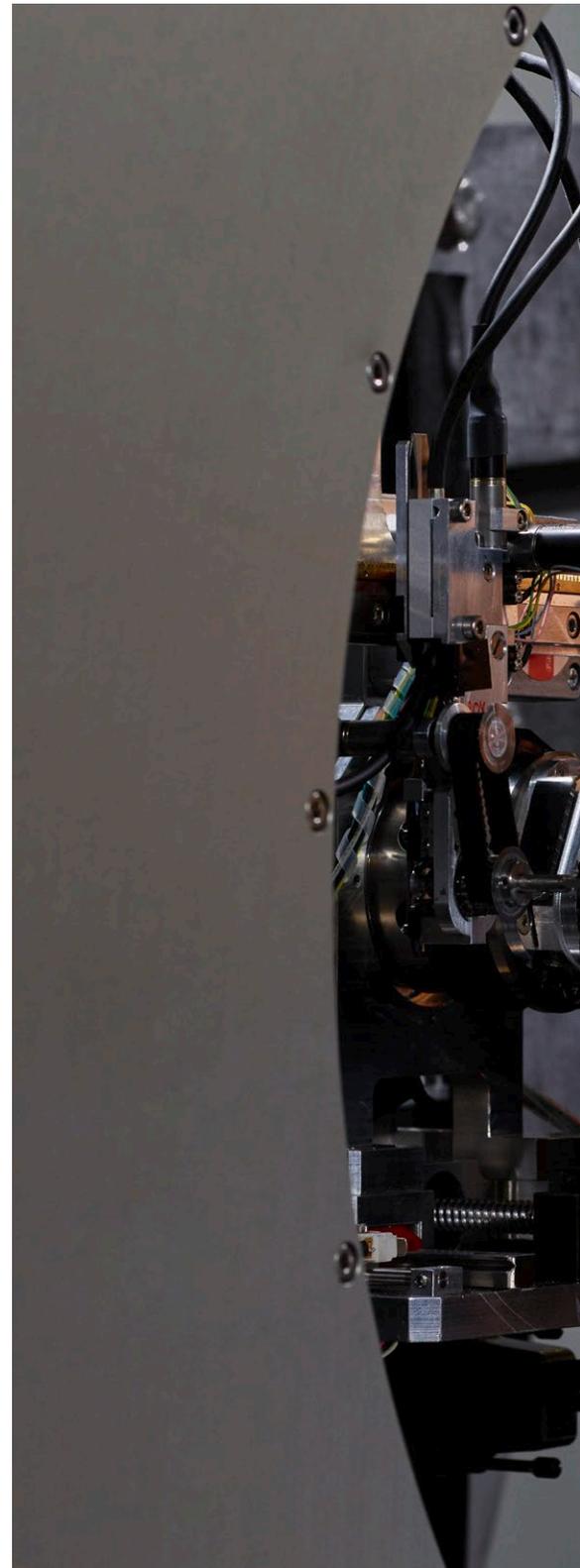
## Innovationen und Entdeckungen

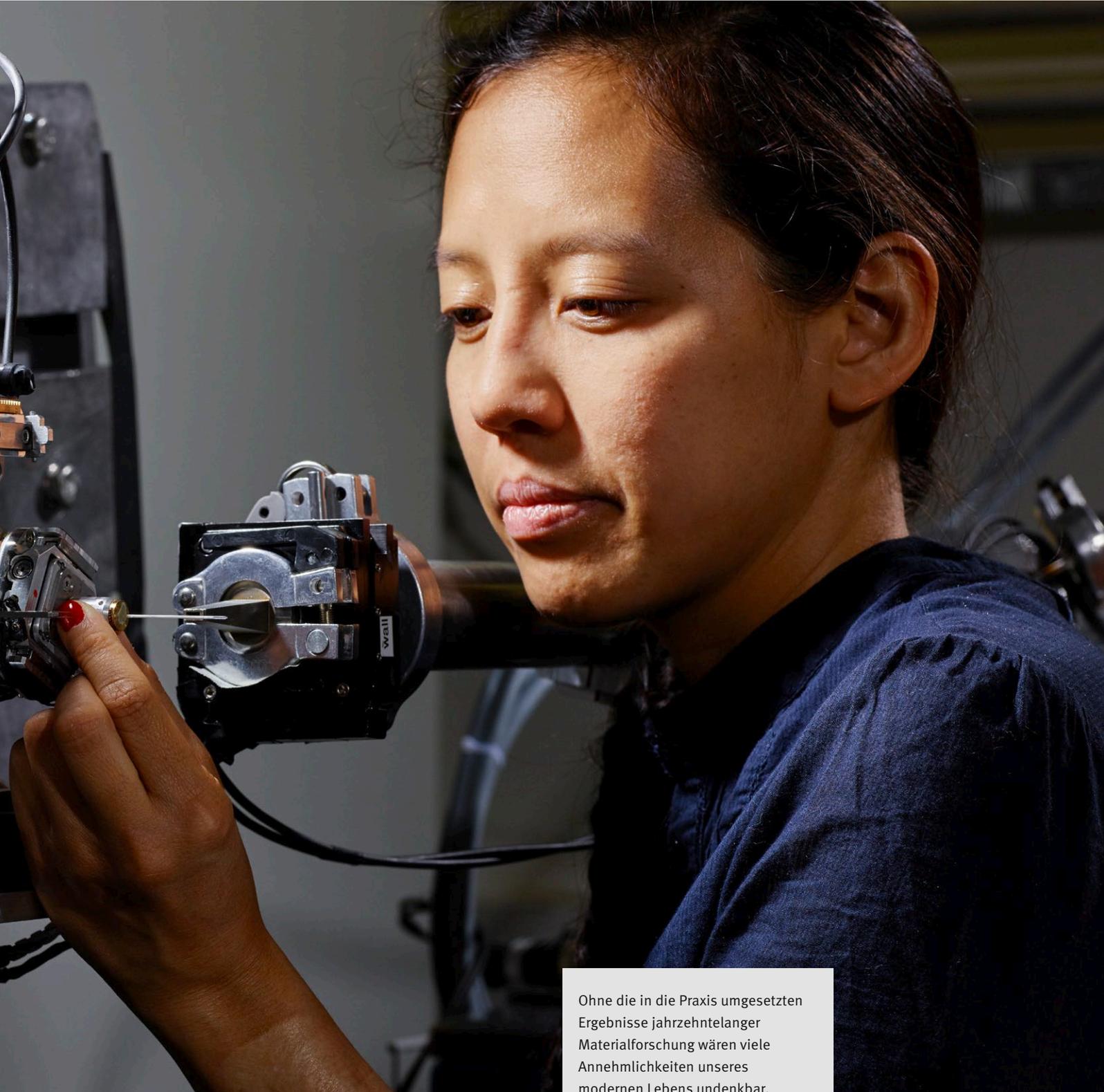
Experimente an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS sind entscheidend, wenn es darum geht, die Wissenschaften voran zu bringen und Probleme in der industriellen Entwicklung und Produktion zu lösen. Hier werden aktuelle Fragestellungen aus der Medizin, der Energie- und Umweltforschung sowie der Materialforschung angegangen.

Am SwissFEL werden ultrakurze, laserartige Pulse aus Röntgenlicht völlig neuartige Experimente in der Biologie, Chemie, Physik und in den Materialwissenschaften ermöglichen.

Gemeinsam werden die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS und der SwissFEL der Forschung und Entwicklung in der Schweiz für viele weitere Jahre einen Spitzenplatz sichern. Sie werden auch in Zukunft Innovationen und bahnbrechende Entdeckungen möglich machen.

Mehr über die Forschung mit extrem hellem Röntgenlicht und ultraviolettem Licht am PSI lesen Sie auf den folgenden Seiten.





Ohne die in die Praxis umgesetzten Ergebnisse jahrzehntelanger Materialforschung wären viele Annehmlichkeiten unseres modernen Lebens undenkbar.

# Strukturen des Lebens

Die moderne medizinische Forschung zeigt, dass dem Leben ein Gewimmel von Molekülen zu Grunde liegt, das dafür sorgt, dass Zellen erschaffen, Keime bekämpft und Schäden repariert werden. Trotz grosser Fortschritte haben wir noch viel zu lernen, wenn wir immer mehr Krankheiten erfolgreich bekämpfen wollen.

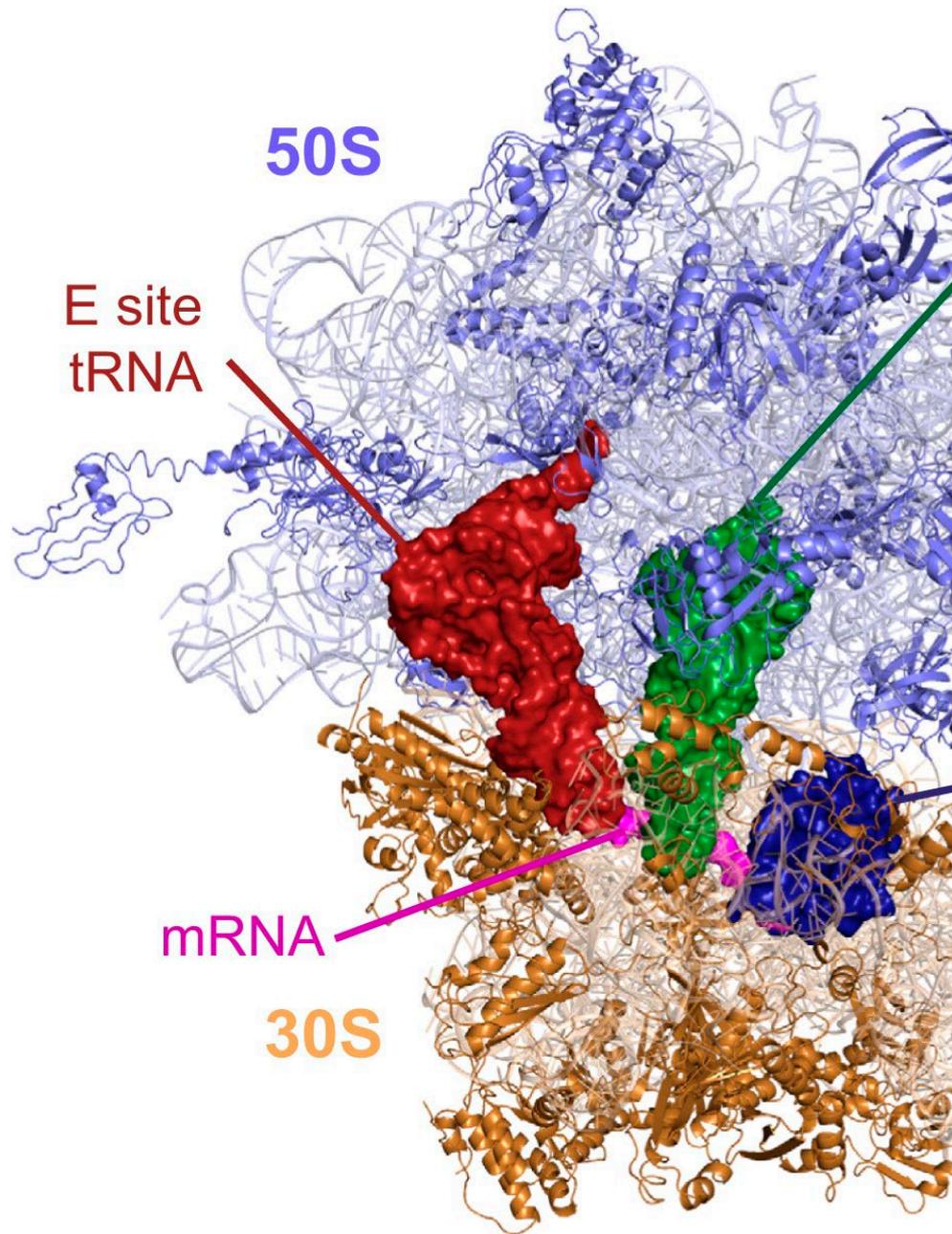
## Tumorwachstum stoppen

Untersuchungen mit Röntgenlicht an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS haben die Entwicklung von Präparaten ermöglicht, die beschädigte Blutgefässe reparieren oder Tumoren in ihrem Wachstum hemmen.

Ein Schnitt in den Finger: Kleinste Blutgefässe werden durchtrennt. Die Sauerstoffzufuhr des umliegenden Gewebes reduziert sich. Alarmstufe für die betroffenen Zellen! Sie rufen ihre weiter entfernten Kollegen zu Hilfe, indem sie einen Botenstoff namens Wachstumsfaktor in alle Richtungen losschicken. Dieser regt die unversehrten Zellen an, neue Zellen und Blutgefässe zu bilden, die die Wunde schliessen.

Es gibt viele Arten von Wachstumsfaktoren. Jeder von ihnen ist auf eine bestimmte Zellart und deren Erneuerung spezialisiert: Hautzellen, Nervenzellen, Zellen für Blut- oder Lymphgefässe.

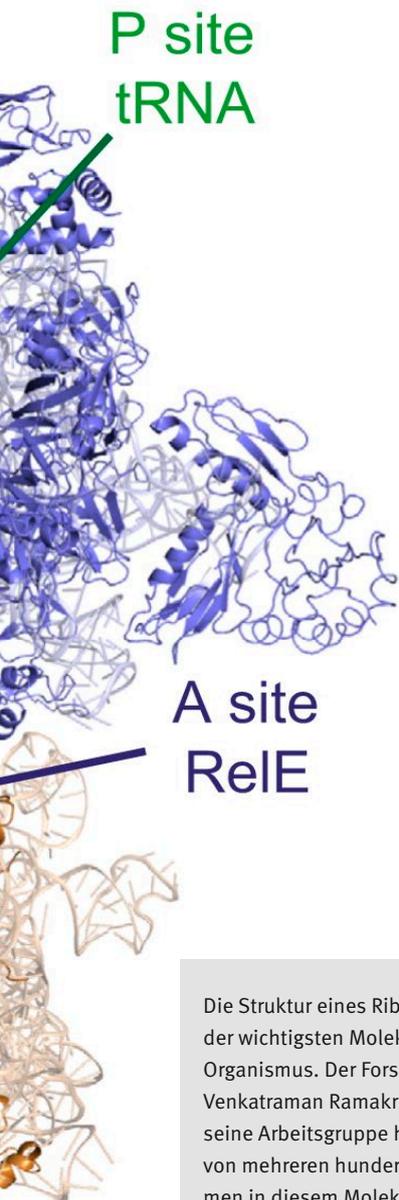
Jedes Wachstumsfaktor-Molekül muss sich präzise ausrichten, um an ein passendes Rezeptormolekül auf der anvisierten Zelloberfläche andocken und so diese Zelle ansprechen zu können. Kurz: Die beiden komplexen und feingliedrigen molekularen Strukturen, von denen jede aus Tausenden von Atomen besteht, müssen exakt richtig im Raum angeordnet sein, um wie Schlüssel und Schloss zueinanderzupassen.



Um diese unvorstellbar diffizilen molekularen Strukturen abzubilden und zu analysieren, braucht es hochmoderne Röntgenanlagen wie die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. In kürzlich durchgeführten Experimenten haben Forschende die genaue Struktur eines Wachstumsfaktors und des zugehörigen

Rezeptors entschlüsselt, die gemeinsam für die Wundheilung von Blut- und Lymphgefässen zuständig sind.

Auf der Basis solcher Messungen lassen sich Medikamente entwickeln, die verhindern, dass Wachstumsfaktoren die Bildung neuer Blutgefässe anregen, die ein Tumor zum Wachstum braucht.



Die Struktur eines Ribosoms, eines der wichtigsten Moleküle in einem Organismus. Der Forscher Venkatraman Ramakrishnan und seine Arbeitsgruppe haben die Lage von mehreren hunderttausend Atomen in diesem Molekül bestimmt. Die dafür nötigen Experimente an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS wie auch an anderen Lichtquellen ermöglichten die wissenschaftlichen Ergebnisse, für die Ramakrishnan – gemeinsam mit zwei weiteren Forschenden – 2009 den Chemie-Nobelpreis erhielt.

## Blind bei Nacht

Dass wir auch bei schwachem Licht noch sehen können, verdanken wir einem lichtempfindlichen Molekül in der Netzhaut unserer Augen: dem Rhodopsin. Forschende am PSI untersuchen, wie genetische Defekte die Funktion dieses Moleküls behindern und damit zu Krankheiten wie der angeborenen Form der Nachtblindheit führen.

Rhodopsin ist ein extrem lichtempfindliches Protein, das in der Netzhaut unserer Augen dazu beiträgt, dass wir auch im Dunkeln noch etwas erkennen können. Rhodopsin gehört zur grossen Familie der sogenannten G-Protein-gekoppelten Rezeptoren. Diese Moleküle finden sich in der Zellmembran, die die Zelle umgibt. Sie registrieren Änderungen ausserhalb der Zelle und leiten entsprechende Signale ins Zellinnere. Im konkreten Fall des Rhodopsins reagiert dieses auf eintreffendes Licht, indem es seine Form ändert und eine Kaskade von Signalen auslöst, die schliesslich das Hirn erreicht.

An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS haben Forschende Rhodopsin in seinem extrem kurzlebigen lichtaktivierten Zustand abgebildet. Damit haben sie den ersten Dominostein gefunden, der den Prozess namens „Sehen“ anstösst.

Die Experimente haben auch gezeigt, dass Nachtblindheit durch einen Defekt in der Struktur des Rhodopsins verursacht wird. Dieser Defekt führt dazu, dass Rhodopsin andauernd aktiviert ist – auch dann, wenn kein Licht darauf trifft. Das Hirn würde also auch bei kompletter Dunkelheit eine schwache Hintergrundhelligkeit wahrnehmen. Ein irritierender Effekt, den der Sehapparat umgeht, indem er schlicht unempfindlicher wird.

Mit dem Verständnis der molekularen Ursache wird es möglich, massgeschneiderte Arzneimittel zu entwickeln. Diese würden zwar die Nachtblindheit nicht

heilen. Sie könnten jedoch den Sichtverlust durch eine bestimmte Art der Netzhautdegeneration, die sogenannte Retinitis pigmentosa, abmildern.

## Nobelpreis

Der Chemie-Nobelpreis ging im Jahr 2009 unter anderem an Venkatraman Ramakrishnan vom MRC-Labor für Molekulare Biologie im britischen Cambridge. Geehrt wurde er für die Entschlüsselung der Struktur des Ribosoms, eines der grössten und wichtigsten Moleküle in der Zelle. Einige der hierfür entscheidenden Messungen waren an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS gelungen.

Ein Ribosom ist ein kompliziert strukturiertes und auf mehreren Ebenen gefaltetes biologisches Riesenmolekül. In jeder Zelle sind unvorstellbar viele Ribosomen damit beschäftigt, die genetische Information der Zelle in zehntausende verschiedene Proteine zu übersetzen, die wiederum vielfältige Aufgaben im Organismus erfüllen.

Um die Struktur des Ribosoms zu entschlüsseln, mussten Forschende die Position jedes einzelnen Atoms, aus dem es besteht, ausmachen. Da ein Ribosom aus Hunderttausenden von Atomen besteht, war dies eine der komplexesten atomaren Kartierungen in der bisherigen Geschichte der Wissenschaft.

Die Experimente waren ausschlaggebend für das heutige Verständnis der Ribosomen und ihrer Arbeitsweise. Sie halfen auch, die Unterschiede zwischen den Ribosomen in Bakterien und denen in menschlichen Zellen auszumachen.

Auf diese Art hilft eine genaue Kenntnis der Ribosomen der modernen Medizin: Viele Antibiotika attackieren die bakteriellen Ribosomen, ohne die menschlichen zu beeinflussen – und besiegen so unsere Infektionskrankheiten.

# Mensch und Gesundheit

**An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS wurden neue Techniken zur Bildgebung entwickelt, die erstaunliche Details sichtbar machen und Forschenden im Bereich Medizin helfen.**

## Hirnforschung

**Myelin ist eine mehrlagige, isolierende Membran, die die schützende äussere Schicht der Nervenfasern bildet. Ist das Myelin beschädigt, kann dies zu Erkrankungen wie Multiple Sklerose führen. Ein neues Bildgebungsverfahren, das an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS entwickelt wurde, kann das Myelin im Hirngewebe besonders detailliert abbilden.**

Unser Nervensystem enthält Millionen Nervenzellen, die Signale durch unseren Körper leiten. Typische Nervenzellen von Säugetieren haben einen Zellkörper, von dem eine Nervenfaser wegführt, die wenige Millimeter oder auch mehr als einen Meter lang sein kann. Im menschlichen Körper befinden sich die längsten Nervenfasern im Ischiasnerv: sie reichen vom Ende der Wirbelsäule bis zum grossen Zeh.

Die äussere Schicht der Nervenfasern besteht aus dem sogenannten Myelin, einem elektrisch isolierenden Stoff, denn in den Nervenfasern werden elektrische Signale weitergeleitet – und das mit bis zu 400 Kilometern pro Stunde. Bei Personen, die an Multipler Sklerose erkrankt sind, ist diese Myelin-Schicht beschädigt, sodass Signale schlecht oder gar nicht mehr transportiert werden – ähnlich wie elektrische Kabel, die bei beschädigter Isolierung einen Kurzschluss erzeugen.

Die Ursache für Multiple Sklerose ist weiterhin unbekannt. Oft verläuft die Krankheit milde, aber manche Menschen verlieren die Fähigkeit zu schreiben, zu sprechen oder zu laufen.

Ein neuartiges 3-D-Bildgebungsverfahren an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS macht es möglich, die Funktion des Myelins auf molekularer Ebene zu untersuchen. So konnten Forscher 3-D-Bilder eines Rattenhirns erstellen, ohne es aufzuschneiden: Ein deutlicher Vorteil gegenüber anderen Untersuchungsmethoden.

Bei der Untersuchung wird das Rattenhirn langsam gedreht, während immer wieder Röntgenaufnahmen erstellt werden. Insgesamt 800 000 Bilder werden am Ende mit einer Spezialsoftware zusammengesetzt und zeigen die Verteilung und jeweilige Dicke des Myelins im Hirn.

Die Forschenden konnten auf diese Weise feststellen, dass die Konzentration an Myelin rund um jene Nervenstränge am grössten ist, die die rechte mit der linken Hirnhälfte verbindet. Diese neue Bildgebung eröffnet neue Möglichkeiten, Veränderungen des Myelins zu untersuchen und in Zusammenhang mit verschiedenen Krankheiten und Krankheitsverläufen zu setzen.

## Makellose Zähne

**Zucker und eine mangelhafte Zahnhygiene – und schon gibt es schmerzhafte Löcher und ein Besuch beim Zahnarzt wird nötig. Röntgenuntersuchungen der molekularen Struktur von gesunden und kranken Zähnen könnten zur Entwicklung neuartiger Zahnfüllungen führen, die deutlich länger haltbar sind.**

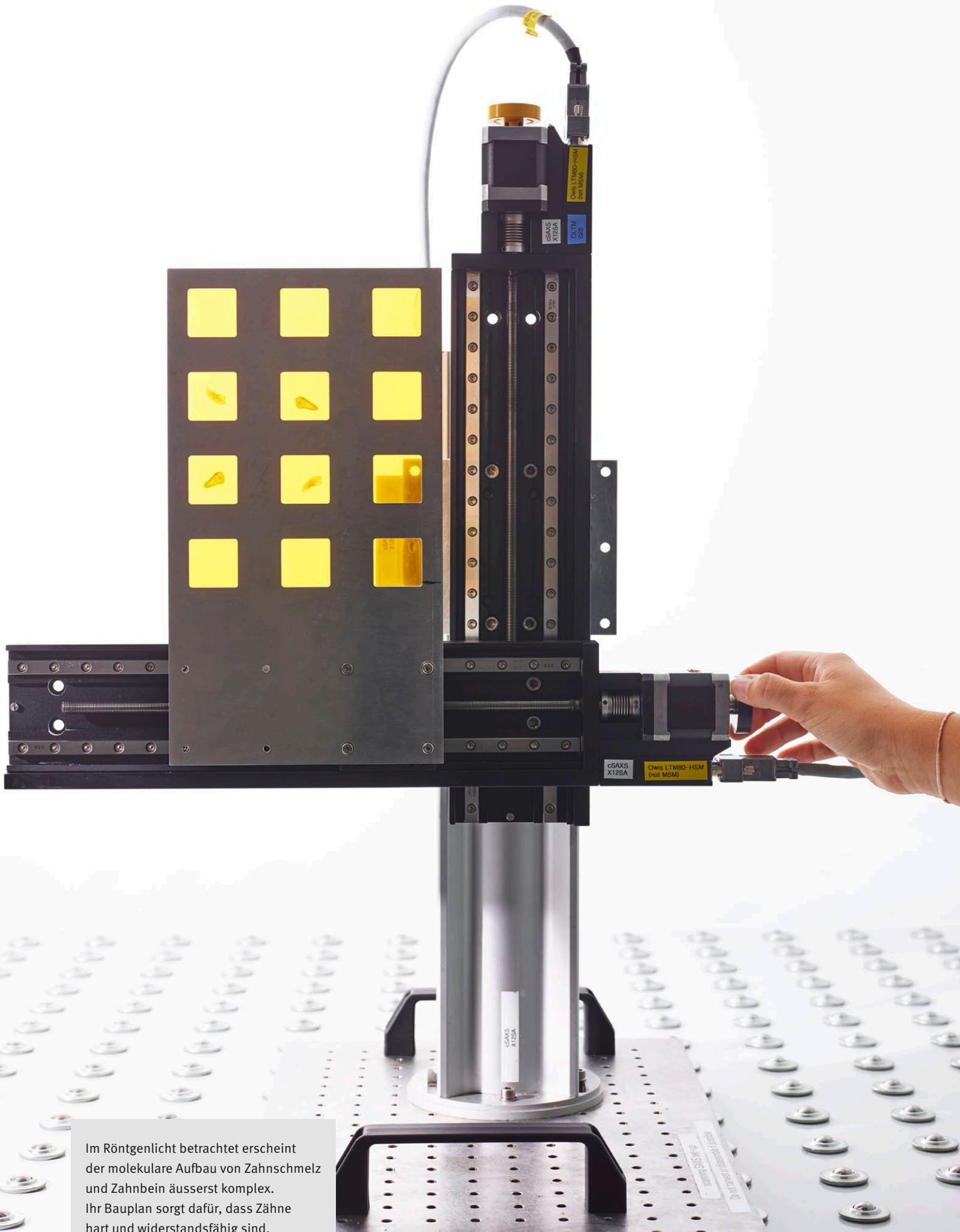
Der Zahnschmelz ist das härteste Material im menschlichen Körper. Er bildet die äussere Schicht des Zahns, darunter befindet sich das etwas weichere Zahnbein. Während sich viele Teile unseres Körpers – beispielsweise Knochen – selbst reparieren können, gilt dies nicht für unsere Zähne. Hier müssen Zahnärzte mit künstlichen Zahnfüllungen nachhelfen.

Röntgenapparate in Zahnarztpraxen helfen, verborgene Zahnprobleme zu finden. Allerdings werden damit nur Strukturen sichtbar, die grösser sind als etwa ein hundertstel Millimeter.

Röntgenuntersuchungen an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS an gesunden und kranken Zähnen haben Details sichtbar gemacht, die zehntausend Mal kleiner sind.

Auf dieser Grössenskala offenbart sich der hochkomplexe molekulare Aufbau des Zahnschmelzes und des Zahnbeins. Gerade dieser Aufbau macht unsere Zähne so hart und widerstandsfähig.

Die Experimente machten die Anordnung der hauchzarten Kollagenfasern im Zahnbein sichtbar und den Bereich, in dem Zahnschmelz und Zahnbein aufeinandertreffen. Es zeigte sich, dass diese Struktur in den verschiedensten Zähnen – selbst in den kariösen – immer sehr ähnlich war. Derzeit setzen Zahnärzte Füllungen ein, die den molekularen Aufbau der Zähne ausser Acht lassen. Die Ergebnisse der Studien am PSI legen nahe, dass Materialien, die der natürlichen Struktur der Zähne angepasst sind, beständiger sein könnten.



Im Röntgenlicht betrachtet erscheint der molekulare Aufbau von Zahnschmelz und Zahnbein äusserst komplex. Ihr Bauplan sorgt dafür, dass Zähne hart und widerstandsfähig sind.

# Material- und Ingenieurwissenschaften

**Manchmal entwickeln sich neue Technologien sprunghaft – einfach dadurch, dass neue Materialien eingesetzt werden. Ob ein potentieller Werkstoff seinen Zweck erfüllen kann, lässt sich oft bereits vorab an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS entscheiden.**

## Kohlenstofffasern

**Kohlenstofffasern, auch Carbonfasern genannt, sind sehr starr. Sie werden gerne genutzt, um andere Materialien zu verstärken. Allerdings ist die Produktion der Fasern kostenintensiv. Daher suchen Ingenieure nach Methoden, die Fasern günstiger herzustellen.**

Verbundstoffe mit Kohlenstofffasern sind leicht und doch robust. Das macht sie zu idealen Materialien für Hochleistungs-Bauteile beispielsweise in Flugzeugen, Yachten und medizinischen Prothesen. Als Ausgangsmaterial für Kohlenstofffasern dient meist das kohlenstoffreiche Polyacrylnitril, kurz PAN. Lange Stränge aus PAN werden unter Sauerstoff-Ausschluss stark erhitzt. Ohne Sauerstoff kann das Material nicht brennen. Stattdessen entstehen lange, ineinander verzahnte Ketten von Kohlenstoff-Atomen, zwischen denen nur noch wenige Atome anderer Elemente verbleiben.

Allerdings ist dieser Herstellungsprozess recht teuer. Daher suchen Ingenieure der Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH nach neuen Methoden, um bessere und günstigere Kohlenstofffasern herzustellen. Lignin, ein im Holz vorkommender Stoff, kommt als alternatives Ausgangsmaterial in Frage und wird derzeit dahingehend untersucht.

Zusammen mit Forschenden am PSI haben Ingenieure von Honda die Struktur der Lignin-Fasern mittels moderner Röntgentomografie untersucht und hochde-

taillierte 3-D-Abbildungen erzeugt. Diese Abbildungen verglichen sie mit denen von üblichen, kommerziellen Fasern.

Die kommerziellen Fasern waren recht einfach strukturiert: Sie hatten einen dichten Kern, der von weniger dichtem Material umgeben war. Dagegen zeigten die ligninbasierten Fasern eine schwammartige Struktur mit winzigen Löchern, die rund ein Tausendstel eines Sandkorns massen.

Diese einzigartigen Einblicke werden es Ingenieuren erlauben, den Zusammenhang zwischen Struktur und Leistungsfähigkeit der Kohlenstofffasern besser zu verstehen.

## Feuerschutz

**Die grosse Hitze eines Gebäudebrandes kann dazu führen, dass Holzbalken splintern, auch wenn sie sich weit entfernt von den Flammen befinden. Hochgeschwindigkeits-Röntgenaufnahmen zeigen, wie die innere Struktur des Holzes seine mechanischen Eigenschaften beeinflusst.**

Bäume wachsen vor allem im Frühjahr und Sommer, was sich im Querschnitt des Stamms als breiter, heller Ring zeigt. Im Herbst und Winter dagegen entsteht ein sehr viel schmalerer, dunklerer Ring aus dichterem Holz. Durch diese Ringe hindurch laufen sogenannte Markstrahlen, die vom Zentrum des Stamms nach aussen laufen und Wasser leiten.

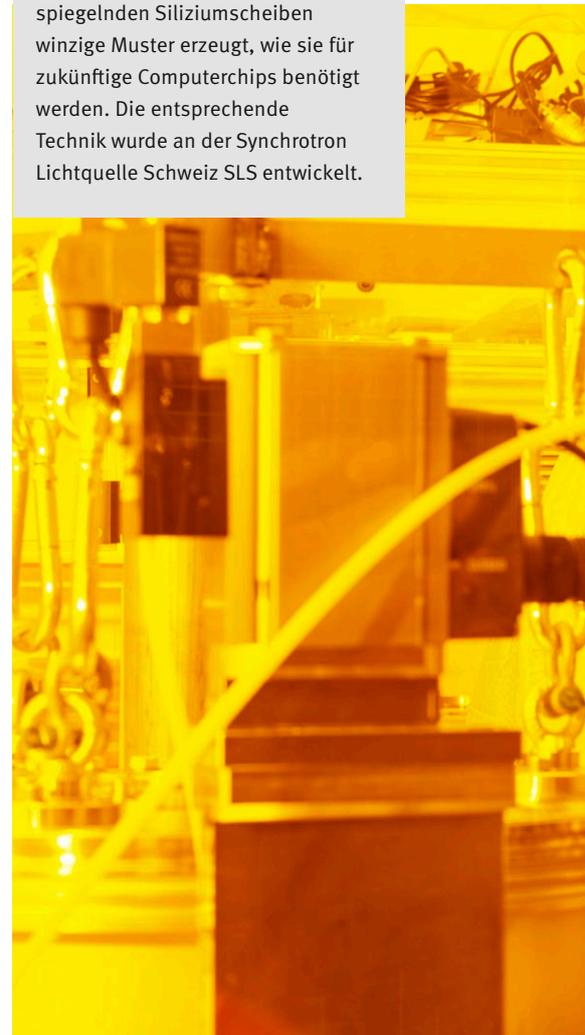
An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS lässt sich Holz in einem speziellen Laser-Ofen schnell auf mehrere hundert Grad Celsius erhitzen. Zugleich können Forschende die Zellstruktur und Spaltungsmuster per Röntgentomografie mikroskopisch vermessen.

Buchenholz beispielsweise wird in vielen Teilen Europas als langlebiges Hartholz eingesetzt. Forschende konnten zeigen, dass Risse durch Überhitzung in diesem

Holz meistens an den Markstrahlen oder an den Knotenpunkten der Jahresringe beginnen.

Bauingenieure und Forschende im Bereich Brandschutz tragen die Daten vieler verschiedener Messmethoden zusammen, um zu verstehen, wie Baumaterialien bei den Temperaturen eines Gebäudebrands reagieren. Dadurch sollen bessere Brandschutz-Massnahmen möglich werden.

PSI-Forschende haben auf solchen spiegelnden Siliziumscheiben winzige Muster erzeugt, wie sie für zukünftige Computerchips benötigt werden. Die entsprechende Technik wurde an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS entwickelt.



## Rekordverdächtige Computerchips

**An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS erproben Entwickler aus der Halbleiter-Industrie neue Herstellungstechniken mit UV-Licht. Das PSI hält den Weltrekord für die kleinsten Strukturen, die je auf einem Silizium-Chip erschaffen wurden.**

Mit Lithografie lassen sich kleinste Schaltkreise auf Siliziumchips prägen. Dieser Technik verdanken wir heute E-Mail, Mobiltelefone, Internetvideos, aber auch sichere Autos, Züge und Flugzeuge. Der Grundbaustein aller Siliziumchips ist der Transistor: Ein winziger, präziser Schalter, der sich Millionen Male pro Sekunde an- und ausschalten lässt. Ein

durchschnittlicher Siliziumchip enthält Millionen Transistoren pro Quadratmillimeter.

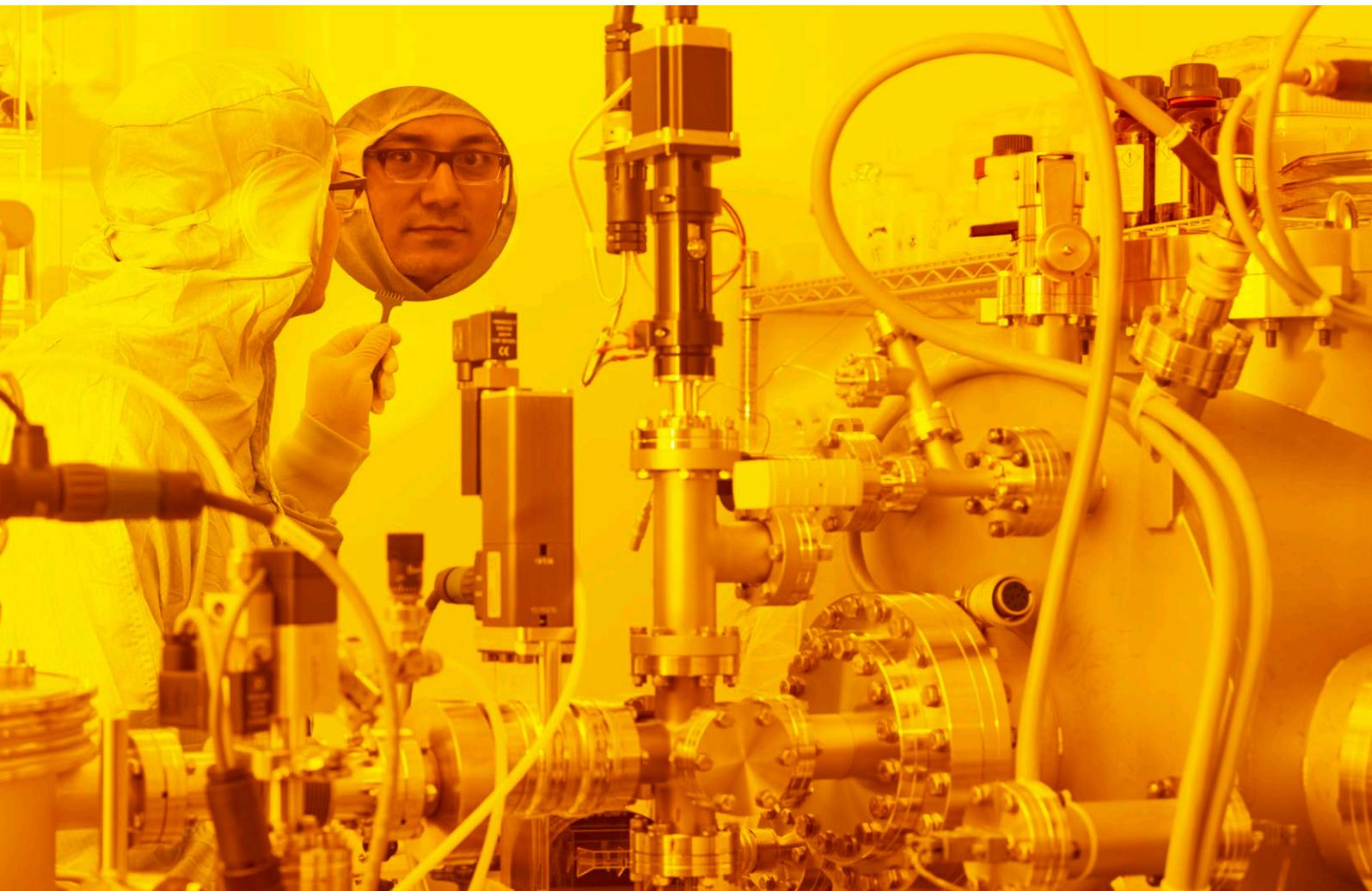
Für die Herstellung von Siliziumchips wird zunächst eine lichtempfindliche Schicht auf das Silizium aufgetragen. Mit einem hochpräzisen Lichtstrahl wird dann das gewünschte Muster mit den feinen Details des Schaltkreises in diese Schicht geschrieben.

Künstler benötigen einen feineren Pinsel, um kleinere Details malen zu können. In der Lithografie hilft eine kürzere Lichtwellenlänge, um kleinste Strukturen zu erzeugen.

Daher nutzen kommerzielle Lithografiegeräte das kurzwellige Ultraviolett-Licht (UV). Von gewöhnlichem UV-Licht mit einer Wellenlänge von 365 Nanometern ist die Tech-

nik inzwischen ins tiefe UV bei 193 Nanometern vorgedrungen. Der nächste Schritt ins extreme UV bei 13,5 Nanometern ist bereits in Aussicht.

An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS haben Forschende des PSI solch extremes UV genutzt, um per Lithografie die kleinste Struktur der Welt herzustellen: Reihen von elektrischen Leitungen, die gerade einmal 14 Nanometer auseinander liegen. Ein menschliches Haar dagegen ist rund 50 000 Nanometer breit und wächst 5 Nanometer pro Sekunde. Die Lithografie-Anlage des PSI ist dem Industriestandard vermutlich um fünf bis zehn Jahre voraus. Hier können Unternehmen und Universitäten ihre Herstellungsmethoden für die Siliziumchips der nächsten Generation testen.



# Magnete manipulieren

Computerfestplatten speichern Daten als kleinste magnetische Bits. Der Erfindung immer besserer Methoden zum Manipulieren von Magneten verdanken wir es, dass sich heute selbst grosse Dateien für Musik, Fotos und Videos digital bannen und wieder abrufen lassen. Zukünftige Technologien müssen einen schnellen Zugriff auf die weiterhin rasant wachsenden Datenmengen erlauben.

## Ein Atom, ein Speicherbit

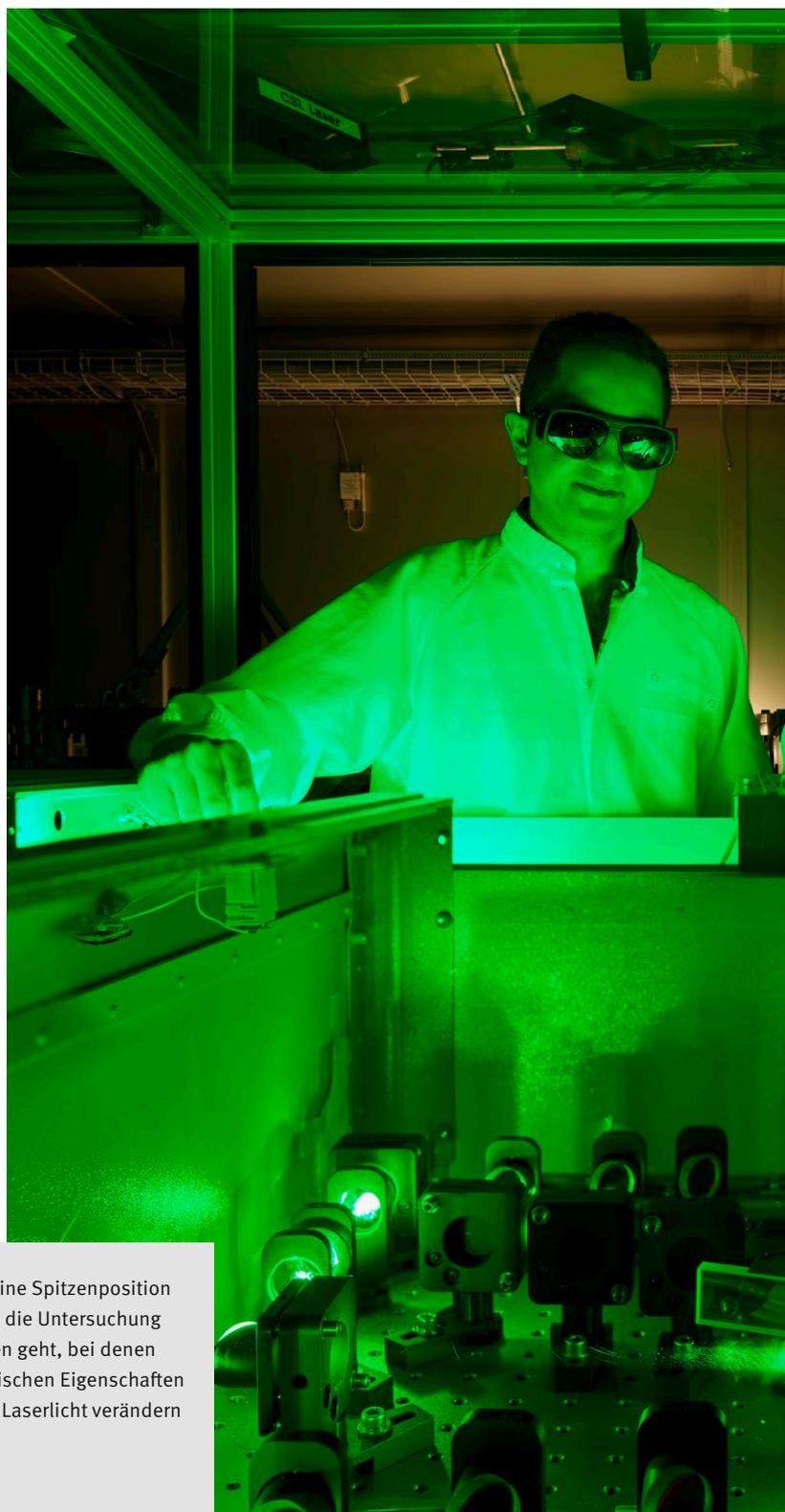
Forschende an Schweizer Universitäten haben in Zusammenarbeit mit IBM in den USA im Labor Atome in einem Zustand erzeugt, den man in Zukunft dafür nutzen könnte, in Computern Daten in einzelnen Atomen zu speichern.

MRAM ist eine Speichertechnik für Computer, mit der sich Daten dauerhaft speichern lassen. Die Technik wird unter anderem in Flugzeugen und Satellitenkontrollsystemen eingesetzt, da kosmische Strahlen MRAM nichts anhaben können.

Damit sich zukünftig mehr Daten pro Volumen speichern lassen, müsste die Grösse der MRAM-Komponenten verringert werden. Doch die atomare Struktur des Materials selbst bildet eine absolute Untergrenze. Ein einzelnes Atom ist die kleinste mögliche Struktur, in der Daten gespeichert werden könnten.

Ein Forschungsteam aus der Schweiz und den USA konnte nun mithilfe von Experimenten am PSI zeigen, dass einzelne Kobaltatome auf einer ultra-dünnen Oberfläche aus Magnesiumoxid in einen hochenergetischen Zustand versetzt werden können, der einen Schritt auf dem Weg zu Magneten aus einzelnen Atomen darstellt.

Das PSI nimmt eine Spitzenposition ein, wenn es um die Untersuchung neuer Materialien geht, bei denen sich die magnetischen Eigenschaften durch Pulse von Laserlicht verändern lassen.





## Lichtschalter für Magnete

**Bei einer neu entwickelten Art von Materialien lässt sich die Richtung der Magnetisierung mit einem Lichtpuls gezielt schalten. Die Erforschung dieses aussergewöhnlichen Effekts ist noch im Anfangsstadium, dennoch gibt es bereits eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten.**

Forschende am PSI haben gezeigt, dass sich in bestimmten Materialien die magnetischen Eigenschaften mit dem Lichtpuls eines Lasers gezielt ändern lassen. Diese neuartige Fähigkeit hat weitreichende Anwendungsmöglichkeiten, darunter auch die zur ultraschnellen Datenspeicherung.

Festplattenlaufwerke speichern Daten auf einer sich schnell drehenden Scheibe, die mit einer magnetisierbaren Schicht überzogen ist. Während die Scheibe unter einem kleinen Schreib- und Lesekopf dahinsurrt, werden die Speicherbits als ein Muster magnetischer Nord- und Südpole geschrieben.

In derzeitigen Festplatten dauert dieses magnetische Schalten – beispielsweise das Vertauschen von Nord- und Südpol – typischerweise einige Nanosekunden. Mit den neuen Materialien und einem Laserpuls wird diese Zeitspanne 1000 Mal kürzer: Das Schalten per Licht dauert dann nur rund eine Pikosekunde (ein Millionstel einer Millionstelsekunde).

Manche der anspruchsvollen und extrem präzisen Experimente zum magnetischen Schalten mit Licht können nur an bestimmten Grossforschungsanlagen der neuesten Generation durchgeführt werden, den sogenannten Freie-Elektronen-Röntgenlasern (XFEL). Seit mehreren Jahren reisen Forschende vom PSI zu Röntgenlasern anderer Institute wie der LCLS in den USA oder dem SACLA in Japan, um XFEL-Experimente durchzuführen. Nun entsteht mit dem Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL ein XFEL direkt am PSI sowie mit dem European XFEL eine ähnliche Anlage in Hamburg. Bald werden Forschende aus Europa für solche Experimente nicht mehr den Kontinent wechseln müssen.

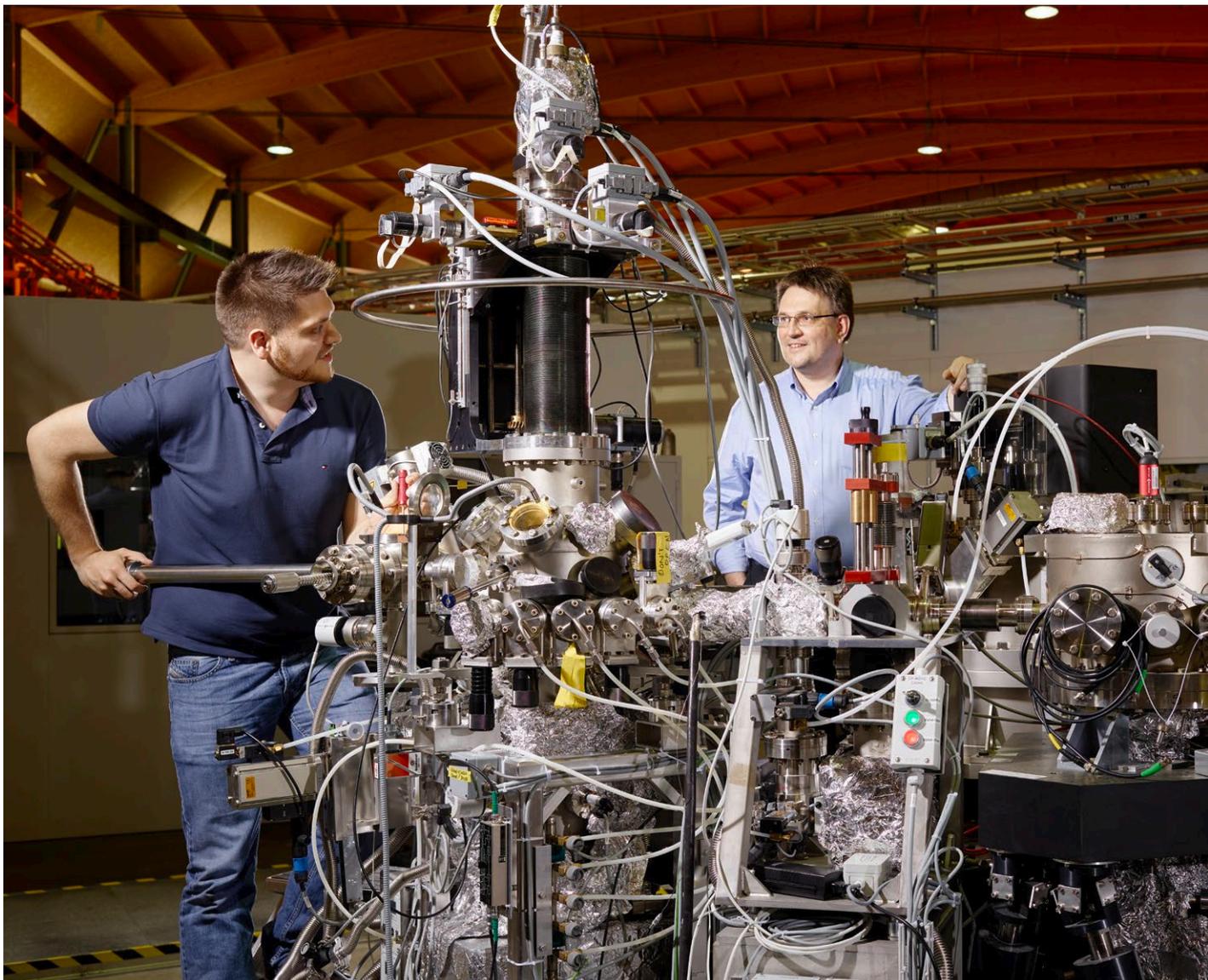
Die Experimente nutzen einen Laserpuls, um die Magnetisierung zu schalten, sowie einen zeitlich darauf abgestimmten, ultrakurzen Röntgenpuls, der unmittelbar nach dem Laserpuls einen Schnappschuss der magnetischen Ausrichtung aufnimmt. Die Forschenden konnten eindeutig zeigen, dass die magnetische Schaltung per Lichtpuls funktioniert. Welcher Effekt sich genau dahinter verbirgt, ist jedoch noch nicht abschliessend geklärt. Die Forschungsgemeinde plant hierzu weitere Experimente.

## Nano-Magnete

**Winzige Magnete verschiedener Formen lassen sich auf einem Untergrund aus Silizium präzise zu unterschiedlichen Mustern anordnen. Sind die einzelnen Magnete kleiner als ein Mikrometer, kommen neue physikalische Phänomene zum Vorschein. Solche Strukturen könnten in Zukunft eine Rolle in der Elektronik spielen: als digitales Speichermedium oder für logische Verknüpfungen.**

Eine Forschungsgruppe am PSI hat eine Methode entwickelt, Muster aus winzigen Magneten auf einem flachen Untergrund anzuordnen und diese mit einem Röntgenmikroskop an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS zu untersuchen. Sind sechs dieser länglichen Magnete wie die Kanten eines Sechsecks angeordnet, so richtet sich ihre Magnetisierung automatisch ringförmig aus: jeder Nordpol trifft dann auf den Südpol des nächsten Magneten. Im Röntgenmikroskop wird diese magnetische Ausrichtung sichtbar. So lässt sich auch verfolgen, was geschieht, wenn mehr und mehr dieser Sechsecke aneinandergefügt werden. Dieses gut kontrollierbare System dient den Forschenden als Modell, mit dem sie die Konstellationen und Wechselwirkungen in tatsächlichen Materialien nachstellen. Präzise mathematische Modelle helfen ihnen, die experimentellen Ergebnisse zu verstehen.

# Quantenmaterie



Bei der Erforschung von Quantenmaterie untersuchen Wissenschaftler das komplexe und unerwartete Verhalten, das sich zeigt, wenn in einem Festkörper viele Elektronen miteinander interagieren. Die hierbei auftretenden unerwarteten Effekte liessen sich eines Tages nutzen, um elektronische Materialien einer neuen Generation herzustellen.

## Orbitonen auf der Spur

Bereits vor über 30 Jahren wurde eine ungewöhnliche, synchrone Bewegung der Elektronen in einem Festkörper vorhergesagt. Nun haben Physiker an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS sie tatsächlich beobachten können.

Im Inneren eines Festkörpers herrscht ein kompliziertes Gemenge: An jedem Elek-

tron und Atomkern zerrn und schieben alle anderen Elektronen und Kerne. Die starken Wechselwirkungen und die unvorstellbare Anzahl der beteiligten Teilchen machen es so gut wie unmöglich, ihr Verhalten vorherzusagen und zu verstehen.

Physiker vereinfachen daher die Beschreibung von Festkörpern durch die Einführung sogenannter Quasiteilchen. Diese sind keine realen Objekte, sondern eine

Das komplexe Verhalten von Elektronen in einem Supraleiter kann mit der hochmodernen Technik an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS sehr genau vermessen werden.

verkürzte Art und Weise, um die kollektive Bewegung sehr vieler Teilchen zu beschreiben.

Statt die verschachtelten Bewegungen aller Elektronen in einem Festkörper zu bestimmen, werden entsprechende Quasiteilchen betrachtet. Diese Quasiteilchen bewegen sich durch den Festkörper und ignorieren dabei einander.

Ein einzelnes Elektron lässt sich nicht weiter teilen – Elektronen sind sogenannte Elementarteilchen. Dennoch sagten in den 1980er Jahren Physiker voraus, dass sich Elektronen, die sich von Atom zu Atom bewegen, als drei Sorten von Quasiteilchen betrachten lassen: Holon, Spinon und Orbiton. Das Holon trägt die Ladung eines Elektrons, das Spinon seinen elementaren Magnetismus und das Orbiton trägt Energie und Impuls des Elektrons.

In einem besonders anspruchsvollen Experiment haben Physiker am PSI Orbiton- und Spinon-Quasiteilchen in einem Material vermessen können. Hierfür fokussierten sie Röntgenlicht auf eine Gruppe von Elektronen und beobachteten, wie sich daraufhin Spinon und Orbiton mit unterschiedlicher Geschwindigkeit in verschiedene Richtungen der Elektronengruppe fortbewegen.

Orbitonen liessen sich womöglich für einen Quantencomputer nutzen. Dieser könnte Berechnungen deutlich schneller ausführen als heutige Rechner.

Eine grosse derzeitige Hürde für Quantencomputer ist, dass Speicherzustände typischerweise zerstört werden, bevor die

gewünschte Berechnung durchgeführt werden kann. Die Orbiton-Umwandlungen sind extrem schnell: Sie dauern nur wenige Femtosekunden, also ein Millionstel einer Milliardestel Sekunde. Diese hohe Geschwindigkeit macht Spinonen und Orbitonen zu vielversprechenden Kandidaten für die Informationsspeicherung in einem zukünftigen Quantencomputer.

## Supraleiter verstehen

**Supraleiter gehören zu den grossen Entdeckungen des 20. Jahrhunderts. Ihre verblüffende Eigenschaft, bei niedrigen Temperaturen elektrischen Strom komplett verlustfrei zu transportieren, wird immer weitreichender genutzt. Forschende am PSI sind an vorderster wissenschaftlicher Front dabei, eine umfassende Erklärung für den Supraleitungs-Effekt zu finden.**

Die Supraleitung wurde im Jahr 1911 entdeckt. In supraleitenden Drähten fliesst elektrischer Strom komplett widerstandslos und somit ohne jeglichen energetischen Verlust. Supraleiter können Stromstärken transportieren, die mehr als einhundert Mal so gross sind wie die in einem Kupferkabel desselben Durchmessers.

Allerdings müssen entsprechende Materialien mit flüssigem Stickstoff oder Helium auf tiefe Temperaturen gekühlt werden, um zu Supraleitern zu werden: Bei vielen Materialien tritt ihre supraleitende Eigenschaft erst bei rund minus 260 Grad Celsius ein.

Supraleiter werden unter anderem in den Magnetresonanztomografen von Krankenhäusern eingesetzt oder als elektronische Filter in Mobilfunkstationen. In manchen Stromnetzen transportieren sie grosse Mengen elektrischen Stroms über kurze Strecken.

Einfachste supraleitende Materialien sind bereits gut verstanden. Allerdings werden immer weitere Materialien entdeckt, die bei tiefen Temperaturen supraleitend werden, und auf die sich die bisherigen Erklärungen nicht anwenden lassen. Diese neuen Materialien werden bereits bei rund minus 170 Grad Celsius supraleitend – und werden daher Hochtemperatur-Supraleiter genannt.

Der wichtigste Baustein typischer Hochtemperatur-Supraleiter sind Schichten, in denen Kupfer- und Sauerstoffatome in einem quadratischen Muster angeordnet sind. Die Kupferatome verhalten sich wie winzige Magnete und scheinen dadurch in noch ungeklärter Weise für die hohe Supraleitungs-Temperatur verantwortlich zu sein. Dies überrascht, da sich üblicherweise Magnetismus und Supraleitung gegenseitig ausschliessen: Klassischerweise zerstört jedes Magnetfeld den supraleitenden Zustand.

Eine Forschungsgruppe aus den USA hat sich darauf spezialisiert, atomar dünne Supraleiter herzustellen: Ihre Materialschichten sind nur eine oder zwei Kupferoxid-Lagen dick.

Im Rahmen einer einzigartigen Zusammenarbeit reisten die US-Forschenden ans PSI und nutzten die extrem präzisen Röntgeninstrumente an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Das PSI ist die einzige Forschungseinrichtung weltweit, an der die Forschenden die nötigen Messungen durchführen konnten.

Die Experimente zeigten, dass in diesen extrem dünnen supraleitenden Filmen tatsächlich Magnetismus vorhanden war. Den Forschenden gelang es, ihre Ergebnisse mit einem simplen Erklärungsmodell zu beschreiben und zu zeigen, dass der Magnetismus im Material die hohe Supraleitungstemperatur überhaupt erst ermöglicht.

Dieses Forschungsergebnis bringt die Wissenschaft einen Schritt weiter auf dem Weg, den Traum von einem Supraleiter bei Raumtemperatur zu realisieren.

# Energie und Umwelt

Ein sparsamer Umgang mit den begrenzten Ressourcen unseres Planeten ist wichtig für die Gesellschaft. Die Forschung am PSI trägt dazu bei, die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Umwelt zu begrenzen.

PSI-Forschende arbeiten daran, möglichst leistungsfähige Materialien für Prototypen aufladbarer Natriumionen-Batterien zu entwickeln. An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS kann in Echtzeit auf der Ebene einzelner Atome beobachtet werden, wie sich die in der Batterie verwendeten Materialien beim Laden und Entladen verändern.

## Gas aus Holz

Holz ist eine vielseitige und erneuerbare Energiequelle. Auch in Schweizer Wäldern kann Holz nachhaltig genutzt werden. Am PSI haben Forschende eine effiziente Technologie entwickelt, mit der sich aus Holz synthetisches Erdgas herstellen lässt.

Aus den Bioabfällen von Privathaushalten, Bauernhöfen und Kläranlagen lässt

sich Biogas herstellen. An vielen Standorten der Schweiz geschieht dies bereits. Holz dagegen lässt sich nicht so leicht fermentieren und wird üblicherweise im heimischen Kamin verbrannt. Das Paul Scherrer Institut PSI hat ein Verfahren entwickelt, mit dem sich Holz auch auf andere Weise als Energiequelle nutzen lässt: als Erdgas. Für die Umwandlung wird das Holz zunächst stark erhitzt, sodass der Feststoff zu einem heissen Gasmisch wird. Diese Gase werden



rekombiniert und formen synthetisches Erdgas, das in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden und somit flexibel und ortsunabhängig genutzt werden kann.

Das heisse Gasgemisch, das anfangs entsteht, enthält Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, Wasserstoff und Wasserdampf. Hinzu kommen einige unerwünschte Nebenprodukte wie Teer und schwefelhaltige Verbindungen.

Diese schwefelhaltigen Stoffe gilt es im nächsten Schritt zu entfernen. Sie lassen Leitungen korrodieren und schädigen die Materialien, die das heisse Gasgemisch schliesslich in Methan – den Hauptbestandteil von Erdgas – umwandeln.

Mithilfe von Experimenten an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS haben

Forschende am PSI ein Material entwickelt, das erfolgreich den Schwefel aus dem heissen Gas abscheidet.

Das neue Material basiert auf dem Element Molybdän. Seiner Entwicklung gingen Untersuchungen mit Röntgenlicht voraus, die den Ablauf chemischer Reaktionen abbilden konnten. Auf der Grundlage dieser Messungen wurde das Material perfekt an die hier vorliegenden Gegebenheiten und Bedürfnisse angepasst.

### Bessere Batterien

**Heute sind Lithiumionen-Batterien die Standard-Akkus für Laptops, Tablets und Mobiltelefone. Doch eine neue Art, die Natriumionen-Batterie, könnte – bei beinahe gleicher Energiedichte – in der Herstellung deutlich günstiger sein.**

Die Speicherung von Energie ist eine grosse gesellschaftliche Herausforderung. Wiederaufladbare Lithiumionen-Batterien sind derzeit der Standard in elektronischen Geräten. Diese Akkus werden zunehmend auch in Elektroautos eingesetzt oder sie speichern Strom, den Windkraft- oder Solaranlagen produzieren.

Ein neuer Typ Akku entsteht, wenn man Lithium durch Natrium ersetzt. Die beiden Elemente sind in ihren chemischen Eigenschaften eng verwandt. Allerdings ist Lithium ein seltener und somit teurer Rohstoff; Natrium dagegen findet sich deutlich häufiger und ist bis zu 50 Mal günstiger.

Die Ansprüche an beide Sorten Akkus sind dieselben: Sie müssen dem Nutzer eine ausreichende Spannung und genug Strom liefern. Daneben müssen sie während des Lade- und Entladevorgangs chemisch und baulich stabil bleiben.

Forschende am PSI haben das Leistungsvermögen von Natriumionen-Batterien untersucht. Mit dem Röntgenlicht der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS lässt sich in das Innere eines Prototyps dieser Batterien blicken, während er geladene oder entladen wird. Dabei werden die Prozesse auf der Ebene einzelner Atome sichtbar. Die Röntgenaufnahmen lassen sich an

der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS extrem schnell erstellen. Sie offenbaren viele hilfreiche Details zur Struktur verschiedener Materialien innerhalb der Batterie. Mehrere Dutzend Prototypen einer Batterie lassen sich dabei zeitgleich untersuchen.

Auf lange Sicht sollen Natriumionen-Batterien entwickelt werden, die sich so einfach und bequem nutzen lassen wie Lithiumionen-Batterien. Forschende am PSI konzentrieren ihre Anstrengungen darauf, diese neue Technologie bestmöglich zu verwirklichen.

### Korrosionsschutz für Schiffe

**Schiffe und andere Objekte, die dem Meerwasser ausgesetzt sind, werden mit speziellen Schutzschichten vor der korrodierenden Wirkung des Salzwassers geschützt. 3-D-Röntgenaufnahmen der Mikrostruktur solcher Lacke offenbaren den Mechanismus dieses Schutzes.**

Hochsee-Schiffe werden üblicherweise mit einem Epoxidlack-Gemisch mit kleinsten Flocken aus Aluminium oder Glass überzogen. Dabei überlappen diese wie Dachziegel, sodass Wasser nur über einen beträchtlichen Umweg bis zum stählernen Schiffsrumpf gelangen kann.

In einer Kooperation mit dem Londoner Zentrum für Nanotechnologie, dem University College London und AkzoNobel, arbeiten Forschende am PSI daran, Schiffslacke zu optimieren. Röntgenuntersuchungen an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS zeigen die flockenartige Struktur und Anordnung einzelner Partikel im Lack auf der Skala von Nanometern.

Beständigkeitstests lackierter Metalloberflächen im Salzwasser können viele Jahre dauern. Durch die Informationen aus ihren Messungen konnten die Forschenden massgeschneiderte Computersimulationen erstellen, die die Leistung der Lacke vorhersagen konnten. Hierdurch lässt sich die Zeit für Produktforschung und Entwicklung deutlich verkürzen.



# Industrie und Innovation

Das PSI heisst Industriebetriebe willkommen, seine Forschungsinfrastruktur zu nutzen.

## Investitionen für Innovationen

Der Zugang zu hochmodernen Synchrotronlichtquellen ist für Unternehmen im Bereich der Lebenswissenschaften entscheidend. Unter anderem helfen hier durchgeführte Experimente, Medikamente gegen Alzheimer, Arthritis und Krebs zu entwickeln.

Proteine sind winzige molekulare Maschinen, die alle Arbeiten erledigen, die nötig sind, um Zellen am Leben zu erhalten. Medizinische Wirkstoffe können die Aktivität der Proteine verändern. In vielen Fällen lässt sich mit einem Medikament sogar ein ganz spezifisches Protein ansteuern.

An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS lässt sich die atomare Struktur von Proteinen und diejenige von medizinischen Wirkstoffen entschlüsseln. Die Messungen zeigen auf, wie Proteine und Wirkstoffe auf der Ebene einzelner Moleküle interagieren und wie man letztere verändern muss, um sie perfekt an ihre Aufgabe anzupassen.

Industrieunternehmen unterstützen zwei Experimentierstationen an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS, die der Untersuchung von Proteinen und medizinischen Wirkstoffen dienen. Die eine wird durch die Schweizer Pharmaunternehmen **Novartis** und **Hoffman-La Roche** sowie durch die deutsche Max-Planck-Gesellschaft unterstützt; die zweite wird teils finanziert durch eine Kooperation zwischen dem Paul Scherrer Institut PSI, **Novartis**, **Actelion**, **Boehringer Ingelheim**, **Proteros** und **Mitsubishi Chemical** in Japan.

## Problemlösungen für die Industrie

Forscher und Entwickler aus der Industrie kommen oft an die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Hier trifft ihr Fachwissen auf dasjenige von universitären Wissenschaftsgruppen und Forschenden des PSI.

In zahlreichen Projekten nutzen Industrieunternehmen die Spitzentechnologie der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS, um aktuelle Probleme zu lösen, ihre Prozesse bei der Produktentwicklung und Herstellung zu optimieren oder um ein umfassendes Verständnis neuer Materialien zu erlangen. Einige dieser Kooperationen sind im Folgenden aufgeführt: Forschende des Londoner Zentrums für Nanotechnologie, des University College London, des PSI und **AkzoNobel** arbeiten gemeinsam daran, optimierte Schutzlacke für Schiffsrümpfe und Offshore-Anlagen zu entwickeln.

Forschende und Entwickler von **Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH** untersuchen Prototypen von Kohlenstofffasern, die eine höhere Leistung sowie günstigere Herstellungskosten versprechen.

Bei der konventionellen Ölförderung bleiben rund 50 bis 70% des Öls zurück. **Shell Global Solutions International B.V.**, das PSI und die Universität Mainz entwickeln gemeinsam eine sichere Methode, um Öl und Gas zu extrahieren, das in kleinen Gesteinsporen eingeschlossen ist.

Nicht nur das Auge isst mit – auch wie sich das Essen im Mund anfühlt, ist für den Genuss entscheidend. Das gilt besonders für industriell hergestellte Nahrungsmittel. **Nestlé** nutzt die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS, um zu ergründen, wie genau sich die Textur von Eiscreme mit der Temperatur ändert.

**IBM** arbeitet an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS mit mehreren Schweizer Universitäten zusammen. Die For-

schenden suchen nach Wegen, die magnetische Datenspeicherung für Computer noch kompakter zu machen und dabei die derzeitigen technischen Grenzen zu sprengen.

**Intel** und **ASML** entwickeln gemeinsam mit Forschenden am PSI moderne Lithografie-Methoden. Hier wird extrem ultraviolettes Licht eingesetzt, mit dem sich womöglich die Siliziumchips der nächsten Generation herstellen lassen.

## Neue Technologien entwickeln

Ein neuartiges, an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS entwickeltes Bildgebungsverfahren lässt sich zur Diagnose von Brustkrebs einsetzen. In Zusammenarbeit mit dem Unternehmen **Philips** wird es am Kantonsspital in Baden getestet.

Eine Mammografie ist eine medizinische Methode, die es Ärztinnen und Ärzten ermöglicht, auf einem Röntgenbild zu erkennen, ob sich im Brustgewebe ein Tumor bildet oder sich dort bereits befindet.

Doch manchmal ist es schwierig, den Unterschied zwischen gesundem und krankem Gewebe auszumachen. Mit einer neuartigen Technik, die von Forschenden an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS zunächst für die Materialforschung entwickelt wurde, lassen sich in speziellen Mammografiegeräten deutlich bessere Bilder des Brustgewebes erstellen.

Ein konventionelles Röntgenbild beruht darauf, dass Röntgenlicht in verschiedenen Gewebearten unterschiedlich stark absorbiert wird.

Die neue Technik nimmt darüber hinaus auch noch auf, wie das durchdringende Röntgenlicht seine Richtung ändert. Diese zusätzliche Information verbessert die Röntgenbilder deutlich. Sie könnte helfen, Brustkrebs noch früherzeitiger als bisher zu diagnostizieren.



Die technologischen Grundlagen der Röntgenlichtdetektoren der Firma DECTRIS wurden am PSI entwickelt. Sie haben die Forschung an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS ebenso nachdrücklich verändert wie auch die industriellen und medizinischen Röntgenmessmethoden.

## Spin-off-Unternehmen

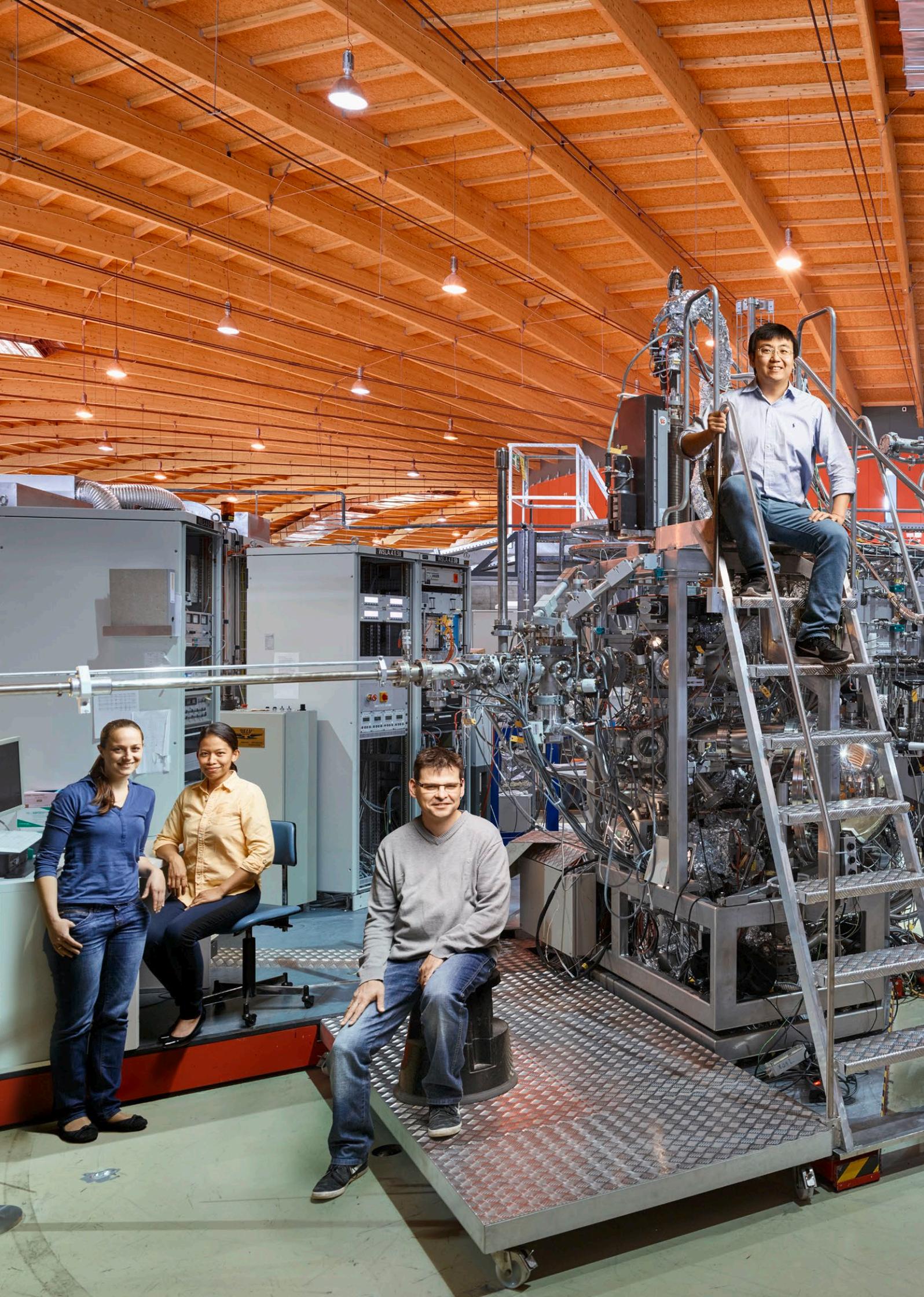
**Vier Spin-off-Unternehmen sind bereits aus den Forschungsarbeiten an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS hervorgegangen. Sie entwickeln und vertreiben Produkte oder bieten Dienstleistungen an, die auf Technologien aus dem PSI beruhen.**

DECTRIS ist der weltweit führende Hersteller von Photonen zählenden Hybrid-Detektoren. Diese Detektoren erlauben ausserordentlich genaue Messungen und haben dadurch die Forschung an Synchro-

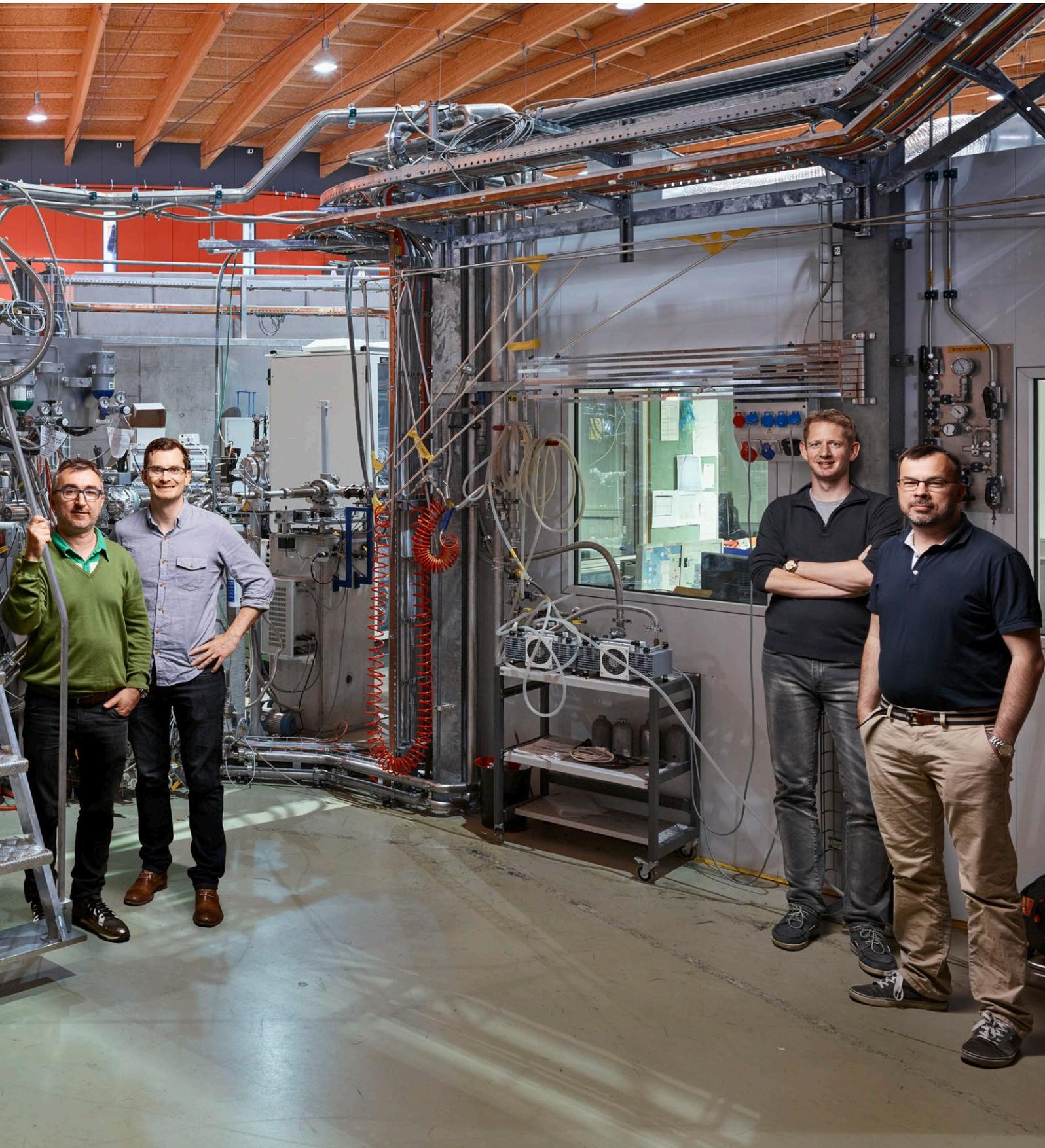
tronlichtquellen genauso revolutioniert wie auch industrielle und medizinische Röntgenmethoden. Die Technologie des erfolgreichsten Produkts, des Pilatus-Detektors, wurde von den Gründern der DECTRIS am PSI entwickelt und ist der Grundstein einer starken internationalen Marktposition. DECTRIS hat inzwischen mehr als 70 Beschäftigte.

Die Gründer von Eulitha haben eine neuartige Lithografie-Technik entwickelt, die extrem ultraviolettes Licht aus der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS nutzt. Unter dem Namen PHABLE bietet Eulitha Dienstleistungen auf dem Gebiet der

Nanostrukturierung für Anwendungen in der Photonik, der Optoelektronik, der Biotechnologie und anderen Gebieten, vertreibt aber auch die dafür nötigen Geräte. Zum Einsatz kommen ihre Produkte in der grossindustriellen Fertigung sowie in Forschung und Entwicklung. Die beiden Spin-off-Firmen **Expose** und **Excelsus Structural Solutions** schliesslich führen für Pharma- und Biotechnologie-Unternehmen an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS Messungen durch und helfen, die dort gewonnenen Daten zu analysieren.



# Im Inneren der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS



# Materie und Licht

Alles um uns herum besteht aus Atomen, den winzigen Bausteinen der Materie. Aneinandergereiht sind zehntausende von ihnen gerade einmal so breit wie ein menschliches Haar. Wie Atome angeordnet sind und wie sie sich verhalten, verfolgen Forschende am PSI mithilfe von extrem hellem, perfekt gebündeltem Röntgenlicht.

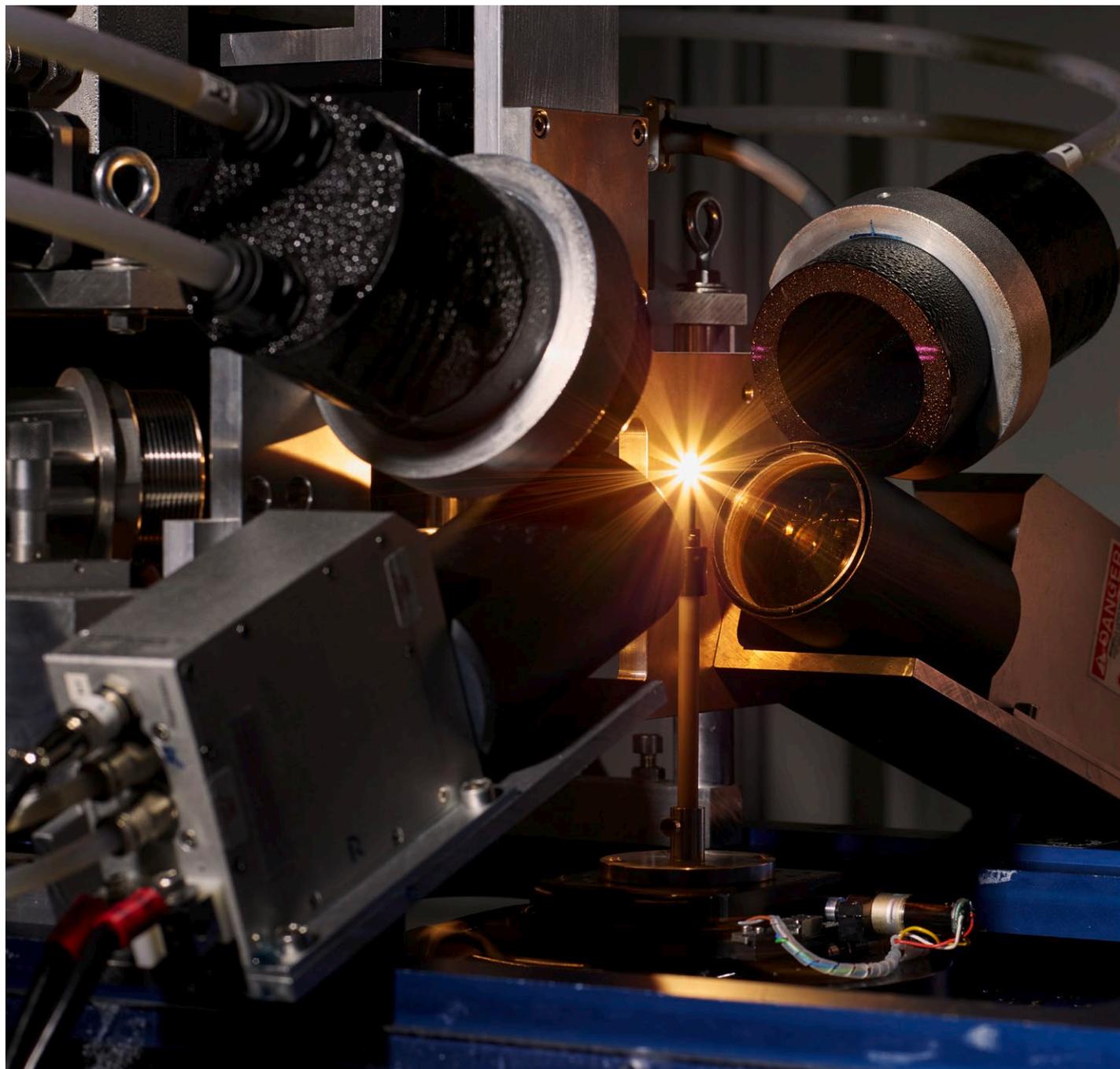
## Atome sind überall

Atome sind die Bausteine der uns umgebenden Materie. Im Zentrum eines Atoms sitzen Protonen und Neutronen eng beieinander und bilden den Atomkern. Eine Wolke von elektrisch geladenen Elektronen umgibt diesen Kern. Atome können sich auf zahlreiche Arten miteinander

verbinden. So formen sie die Substanzen und Materialien unseres Universums.

## Überall ist Licht

Für unsere Augen ist das sichtbare Licht ein unerlässlicher Verbündeter. Und doch stellt es nur einen winzigen Ausschnitt



aus dem breiten Spektrum der elektromagnetischen Wellen dar. Diese reichen von Radiowellen bis zu den Gammastrahlen. Licht ist pure Energie. Atome können diese Energie absorbieren und in sich aufnehmen. Radio- und Mikrowellen haben die geringste Energie. Im mittleren Bereich liegen das sichtbare und das ultraviolette

Licht. Hochenergetisches Licht wird Röntgenlicht genannt, wobei Gammastrahlen sogar noch mehr Energie haben. Mit Mikrowellen lässt sich Essen erwärmen. Sichtbares Licht wird in der Retina des Auges in ein elektrisches Signal umgewandelt, das schliesslich ans Hirn weitergeleitet wird. Der ultraviolette Anteil des Sonnenlichts bringt das Melanin

unserer Haut dazu, sich mit Sauerstoff zu kombinieren und so die Haut dunkler zu färben. Röntgenlicht erlaubt, in das Innere des menschlichen Körpers zu blicken.

## Licht für Experimente

An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS werden Strahlen von Röntgen- und ultraviolettem Licht genutzt, um Materialien und Objekte zu durchleuchten, ihre Eigenschaften auf der Ebene einzelner Atome zu verstehen oder auch gezielt zu verändern.

Trifft Röntgenlicht auf ein Objekt, so dringt der Strahl in das Material ein und wird an den Atomen gestreut.

Dieses gestreute Licht wird von Detektoren (vergleichbar mit Digitalkameras) aufgefangen, die um das Objekt herum aufgestellt sind. Die von den Detektoren gemessenen Lichteigenschaften erlauben Rückschlüsse auf die Lage und Bewegung der Atome. Eine schnelle Bildersequenz lässt sich zudem zu 3-D-Filmen der atomaren Prozesse zusammensetzen.

An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS können bis zu 16 Experimentierplätze gleichzeitig genutzt werden. Jeder von ihnen ist auf eine eigene Sorte von Experimenten mit Licht spezialisiert.

Der SwissFEL wird, sobald er voll betriebsbereit und ausgebaut ist, sechs Experimentierplätze haben.



An der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS durchleuchten Forschende Materialien und Objekte mit ultraviolettem Licht und Röntgenlicht, um ihre Eigenschaften auf der Ebene einzelner Atome besser zu verstehen.

# Das besondere Licht der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS

Das Synchrotronlicht wird im Speicherring erzeugt, der kreisförmig in einem Betontunnel verläuft. Elektronen fliegen dort mit nahezu Lichtgeschwindigkeit eine Million Runden pro Sekunde. Ein Team von Beschleunigeroperatoren sorgt rund um die Uhr für einen reibungslosen Betrieb der SLS.





Um das besondere Licht für die wissenschaftlichen Experimente zu erzeugen, haben Forschende und Ingenieure gemeinsam eine riesige Maschine mit überwältigender technischer Präzision entwickelt: die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Die Synchrotronlichtquelle ist in einem eigenen, kreisrunden Gebäude auf dem Gelände des Paul Scherrer Instituts PSI westlich der Aare untergebracht.

Unter einem hohen, geschwungenen Dach aus hellem Holz reihen sich die metallisch glänzenden, technisch hochkomplexen Bauteile der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS aneinander. Das Ganze wirkt zunächst wie ein Durcheinander aus Rohren, Kabeln, Laborwänden. Doch wer sich eine Weile in dem faszinierenden Gebäude umsieht, erkennt bald, wie perfekt hier alles zusammenpasst.

### Extrem schnelle Elektronen

Das Licht der SLS wird von Elektronen abgestrahlt, die durch mehrere Teilchenbeschleuniger auf nahezu Lichtgeschwindigkeit gebracht wurden. Die Elektronen kreisen in einem Elektronenspeicherring – einem ringförmig installierten Vakuumrohr umgeben von einem Betontunnel mit einem Umfang von rund 288 Metern. Hunderte von Magneten entlang der Röhre halten die Elektronen auf ihrer gekrümmten Bahn im Zentrum des Rohrs fest.

Der Elektronenstrahl an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS ist fein wie ein Spinnenfaden. Die schnellen Elektronen kreisen hierin stundenlang. Vereinzelt kollidieren Elektronen miteinander, werden aus dem Strahl geschleudert und gehen verloren. Regelmässig erhält der Strahl daher neue, frisch beschleunigte Elektronen. Der Elektronenstrahl

und die erzeugten Lichtstrahlen bleiben so stets gleich intensiv.

Die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS arbeitet durchgehend Tag und Nacht mehr als 220 Tage im Jahr. Nach einer Betriebspause dauert es mehrere Minuten, den Speicherring komplett mit Elektronen zu füllen.

### Elektronen und Licht

Schnelle Elektronen senden Licht aus, wenn sie gezwungen werden, ihre Richtung zu ändern. In der SLS nötigen spezielle Magnetanordnungen, sogenannte Undulatoren, die Elektronen, sich auf einem extrem schnellen Slalomkurs zu bewegen, und so Licht für die Experimente abzustrahlen. Während die Elektronen ihren Weg im Speicherring fortsetzen, bewegt sich das so erzeugte Synchrotronlicht geradlinig Richtung Experiment. Spezialspiegel leiten und fokussieren das Licht auf seinem Weg bis zu den Materialien, die untersucht werden sollen. Dieses bildet einen besonders hellen, hochkonzentrierten Ultraviolett- oder Röntgenstrahl.

### Immer heller

Eine Neuentwicklung in der Vakuumtechnologie soll an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS noch hellere Synchrotron-Lichtstrahlen ermöglichen. Der hierfür anstehende Ausbau soll im Jahr 2021 abgeschlossen sein. Die Lebensdauer der Grossanlage würde sich damit um 20 Jahre verlängern. Mit dem intensiveren Licht liessen sich zudem neue Forschungsgebiete erschliessen.

# SwissFEL – der Freie-Elektronen-Röntgenlaser am PSI

Der Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL ist die neueste Grossforschungsanlage des PSI. Sein einzigartiges Röntgenlicht macht den Weg frei für wichtige Experimente in den Bereichen Energie, Umwelt, Medizin, Materialien und neue Technologien.

Der SwissFEL festigt somit die internationale Spitzenposition der Schweiz in Wissenschaft und Forschung. Auch die Wirtschaft profitiert.

Der SwissFEL erzeugt ultrakurze Pulse von Röntgenlicht, die die Eigenschaften von Laserlicht haben. Sie sind eine Milliarde Mal so hell wie das Licht der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS.

Die Röntgenpulse sind so lichtstark, dass sich mit ihnen Filme der Bewegung von Atomen und Molekülen erstellen lassen. Der SwissFEL arbeitet damit komplementär zur Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Gemeinsam kommen diese beiden Einrichtungen der steigenden Nachfrage nach hochmodernen Röntgen- und Ultraviolett-Strahlen entgegen.

## Was ist ein Freie-Elektronen-Röntgenlaser?

Ein Freie-Elektronen-Röntgenlaser konzentriert Röntgenlicht in einem unvorstellbar hellen, ultrakurzen Röntgenlaserpuls. Weltweit gibt es nur eine Handvoll vergleichbarer Grossgeräte.

In einem Freie-Elektronen-Röntgenlaser wird ein Elektronenstrahl auf beinahe Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Dieser Elektronenstrahl durchläuft dann eine lange Undulator-Strecke: Mithilfe von Magneten werden hier die Elektronen auf einen schnellen Slalom-Kurs gezwungen. Durch den ständigen Richtungswechsel senden die Elektronen in enger Folge ultrakurze Pulse von Röntgenlicht aus.

## An der Spitze der Forschung

Die Experimente am SwissFEL ermöglichen ein Verständnis von Materie und Materialien auf einem gänzlich neuen Niveau – sei es in der Biologie, Chemie, in den Ingenieurs- oder Materialwissenschaften.

Die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS kann grossartige Erfolge vorweisen: Die statische Struktur zahlreicher wichtiger Proteine wurde hier ermittelt. Mit dem SwissFEL ist es nun auch möglich, die Bewegung innerhalb dieser Proteine zu verfolgen. Dies eröffnet ganz neue Einblicke in die Prozesse im menschlichen Körper.

Die chemische Zusammensetzung sowie die geometrische Struktur einer Substanz bestimmt, wie sie sich in einer chemischen Reaktion verhält. Am SwissFEL können Forschende die einzelnen Schritte solcher Reaktionen beobachten. Der SwissFEL erweitert unser Verständnis, wie magnetische Eigenschaften von Materialien entstehen und wie man sie verändert. Damit ebnet der SwissFEL den Weg für die Computer der Zukunft, die immer mehr Daten auf immer kleinerem Raum speichern sollen. Forschende können zum Beispiel untersuchen, wie sich mithilfe von Licht magnetische Daten gezielt speichern lassen, und wie Informationen erheblich schneller übertragen werden können als bisher.

## Den Wirtschaftsstandort Schweiz stärken

Der SwissFEL orientiert sich stark an den Anforderungen der schweizerischen Hochschulen und der Industrie und berücksichtigt deren Forschungsinteressen und -bedürfnisse.

Durch den SwissFEL wird der Forschungsstandort Schweiz langfristig gestärkt und

In den Undulatoren entsteht das SwissFEL-Röntgenlicht. Produziert wurden sie in Zusammenarbeit mit der Daetwyler-Gruppe: Peter Daetwyler (links) mit SwissFEL-Projektleiter Hans Braun bei den fertig aufgestellten Undulatoren kurz vor der Inbetriebnahme der neuesten Grossforschungsanlage des PSI.

gleichzeitig ein Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Schweizer Wirtschaft geleistet. Diese Wettbewerbsfähigkeit basiert hauptsächlich darauf, dass innovative Produkte vor denen der Mitbewerber auf den Markt gebracht werden. Erstklassige Forschungsmöglichkeiten im eigenen Land erlauben es, frühzeitig neues Wissen sowie neuartige Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, die den globalen Herausforderungen Rechnung tragen. Die Schweizer Industrie profitiert aber auch unmittelbar von den neuen Forschungsmöglichkeiten am SwissFEL, sei es durch Kollaborationen mit dem PSI und



den Hochschulen oder durch Untersuchungen an der SwissFEL-Anlage im Rahmen eigener Entwicklungsarbeit.

### Noch mehr SwissFEL ab 2020

**Im Jahr 2020 wird am SwissFEL eine zweite Strahllinie ihren Betrieb aufnehmen. Sie erlaubt eine noch grössere Vielfalt an Experimenten.**

Die Experimentierstationen am SwissFEL wurden genau auf die zu erwartenden

Bedürfnisse ihrer Benutzerinnen und Benutzer hin konzipiert. Denn jede zu untersuchende Fragestellung – ob biologisch, chemisch oder physikalisch – stellt andere Anforderungen an die Versuchsanordnung und an die für die Untersuchung am besten geeignete Methode. Aber auch die Art des Röntgenlichts entscheidet darüber, was damit am besten erforscht werden kann: Momentan können die Forschenden am SwissFEL ihre Versuche mit sogenanntem «harten» Röntgenlicht durchführen. Dieses Röntgenlicht hat eine extrem kurze Wellenlänge und eignet sich zum Beispiel opti-

mal dafür, zu verfolgen, wie und wohin sich Atome während eines ultraschnellen Prozesses bewegen.

Wollen die Forschenden jedoch genauer verstehen, was mit Atomen oder Molekülen geschieht, während sie eine neue chemische Verbindung eingehen, oder wie sie auf Einflüsse von aussen wie elektromagnetische Felder oder Licht reagieren, benötigen sie «weiches» Röntgenlicht mit einer grösseren Wellenlänge. Eine zweite Strahllinie am SwissFEL wird genau dieses Licht erzeugen. Sie nimmt 2020 ihren Betrieb auf.

# Wir machen's möglich

## Instandhaltungsfachmann

Sorgt für perfekte Leitungen, die kaltes Wasser und komprimierte Luft transportieren

Etliche Menschen mit verschiedenem Fachkönnen müssen zusammenkommen, um die Grossforschungsanlagen des PSI Tag und Nacht am Laufen zu halten. Hier sind einige von ihnen:

## Technischer Koordinator

Begleitet Projekte und stimmt die Einsatzpläne der verschiedenen Fachleute aufeinander ab

## Strahlenschutztechniker

Trägt Sorge, dass die Arbeitsumgebung für alle sicher ist

## Reinigungsfachkraft

Reinigt vorsichtig rund um die empfindlichen und teuren Instrumente

## Beschleuniger-Physikerin

Liefert extrem helles Synchrotronlicht für Experimente

## Assistentin des Bereichsleiters

Unterstützt die Bereichsleitung bei allen administrativen und organisatorischen Aufgaben

## Software-Entwickler

Schreibt Steuerungssoftware, die für hochpräzise Experimente sorgt

## Elektronik-Ingenieur

Entwickelt elektronische Bauteile zum exakten Positionieren der wissenschaftlichen Instrumente

**Elektriker**

Installiert die Hauptstromzufuhr und sorgt für die gesamte elektrische Verkabelung der Strahlröhren

**Kranführer**

Fährt Tonnen an wissenschaftlicher Ausrüstung geschickt von A nach B

**Strahlröhren-Techniker**

Sorgt für den Unterhalt der Strahlröhre und konstruiert neue Komponenten

**Vakuum-Ingenieur**

Ermöglicht luftleere Röhren für kollisionsfreie Teilchenreisen

**Detektor-Physikerin**

Macht ultraschnelle Detektoren, die experimentelle Ergebnisse festhalten

**Forscherin**

Entwirft Experimente, um neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen

**Polymechanikerin**

Baut individuelle und hochpräzise Komponenten für wissenschaftliche Instrumente



Das Paul Scherrer Institut PSI aus der Vogelperspektive.  
Das kreisförmige Gebäude im Hintergrund westlich der Aare ist die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS.  
Der Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL befindet sich jenseits der Aare im Wald.



# Das PSI in Kürze

Das Paul Scherrer Institut PSI ist ein Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften. Am PSI betreiben wir Spitzenforschung in den Bereichen Zukunftstechnologien, Energie und Klima, Health Innovation und Grundlagen der Natur. Durch Grundlagen- und angewandte Forschung arbeiten wir an nachhaltigen Lösungen für zentrale Fragen aus Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft. Das PSI entwickelt, baut und betreibt komplexe Grossforschungsanlagen. Jährlich kommen mehr als 2500 Gastwissenschaftler aus der Schweiz, aber auch aus der ganzen Welt zu uns. Genauso wie die Forscherinnen und Forscher des PSI führen sie an unseren einzigartigen Anlagen Experimente durch, die so woanders nicht möglich sind. Die Ausbildung von jungen Menschen ist ein zentrales Anliegen des PSI. Deshalb sind etwa ein Viertel unserer Mitarbeitenden Postdoktorierende, Doktorierende oder Lernende. Insgesamt beschäftigt das PSI 2200 Mitarbeitende. Damit sind wir das grösste Forschungsinstitut der Schweiz.

## Impressum

### Konzeption/Texte

Dr. Martyn J. Bull

### Redaktion

Dr. Martyn J. Bull, Christian Heid,  
Dr. Laura Hennemann,  
Dr. Paul Piwnicki

### Fotos und Illustrationen

Alle Fotos Scanderbeg Sauer  
Photography ausser:

Seite 6: Unverändertes Bild aus:  
*The Structural Basis for mRNA Recognition  
and Cleavage by the Ribosome-Dependent  
Endonuclease RelE*; Cell, 2009 Dec 11;  
139(6): 1084–1095 (doi: 10.1016/j.  
cell.2009.11.015), Copyright:  
[creativecommons.org/licenses/by/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Seite 27: Frank Reiser  
Seite 30: Markus Fischer

### Gestaltung & Layout

Mahir Dzambegovic

### Druck

Paul Scherrer Institut

### Zu beziehen bei

Paul Scherrer Institut  
Events und Marketing  
Forschungsstrasse 111  
5232 Villigen PSI, Schweiz  
Tel. +41 56 310 21 11

Villigen PSI, Oktober 2018

## Kontakte

### Forschungsbereichsleiter

#### Photonenforschung

Prof. Dr. Gabriel Aepli  
Tel. +41 56 310 42 32  
[gabriel.aepli@psi.ch](mailto:gabriel.aepli@psi.ch)

#### Stabsleitung Photonenforschung

Elizabeth Bianchi a.i.  
Tel. +41 56 310 43 77  
[elizabeth.bianchi@psi.ch](mailto:elizabeth.bianchi@psi.ch)

#### Wissenschaftskoordinator und CEO SLS Techno Trans AG

Stefan Müller  
Tel. +41 56 310 54 27  
[stefan.mueller@psi.ch](mailto:stefan.mueller@psi.ch)

#### Leiter Labor für Makromoleküle und Bioimaging

Dr. Oliver Bunk  
Tel. +41 56 310 30 77  
[oliver.bunk@psi.ch](mailto:oliver.bunk@psi.ch)

#### Leiter Labor für Röntgen-Nanowissen- schaften und Technologien

Dr. Yasin Ekinci  
Tel. +41 56 310 28 24  
[yasin.ekinci@psi.ch](mailto:yasin.ekinci@psi.ch)

#### Leiter Labor für Kondensierte Materie

Prof. Dr. Frithjof Nolting  
Tel. +41 56 310 51 11  
[frithjof.nolting@psi.ch](mailto:frithjof.nolting@psi.ch)

#### Leiter Labor für Femtochemie

Prof. Dr. Christoph Bostedt  
Tel. +41 56 310 35 94  
[christoph.bostedt@psi.ch](mailto:christoph.bostedt@psi.ch)

#### Leiter Labor für Hochentwickelte Spektroskopie und Röntgenquellen

Prof. Dr. Luc Patthey  
Tel. +41 56 310 45 62  
[luc.patthey@psi.ch](mailto:luc.patthey@psi.ch)

#### Leiter Labor für Nichtlineare Optik

Prof. Dr. Adrian Cavalieri  
Tel. +41 56 310 30 79  
[adrian.cavalieri@psi.ch](mailto:adrian.cavalieri@psi.ch)

#### Leiterin Abteilung Kommunikation

Dr. Mirjam van Daalen  
Tel. +41 56 310 56 74  
[mirjam.vandaalen@psi.ch](mailto:mirjam.vandaalen@psi.ch)

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

SLS\_Science with light\_d, 5/2023

