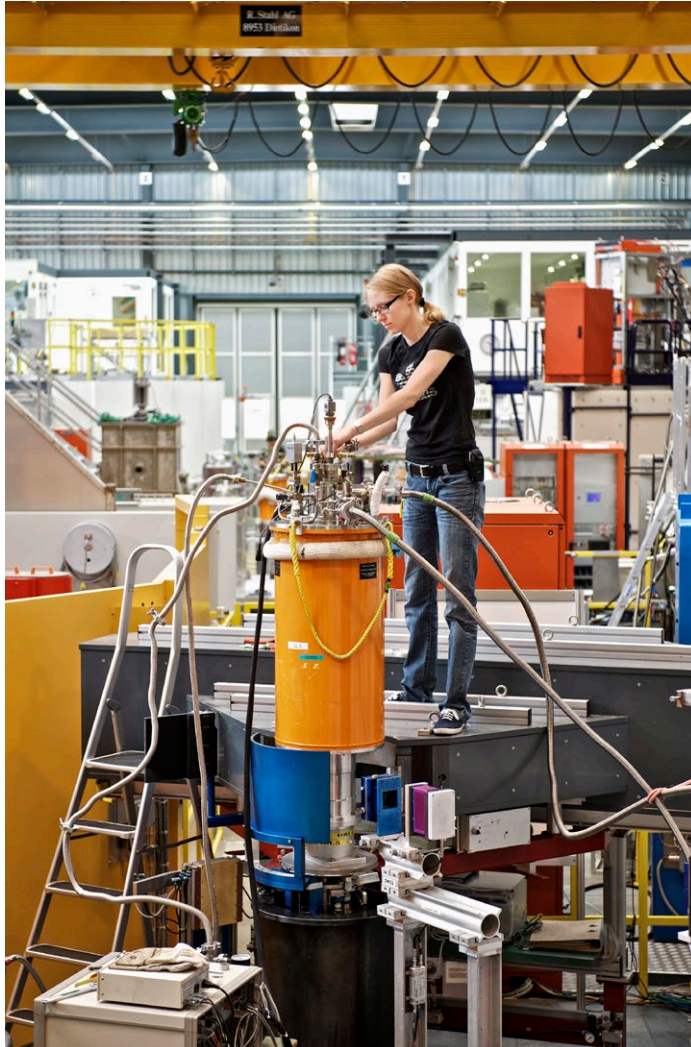


PAUL SCHERRER INSTITUT



# Neutronen und Myonen

Forschung am Paul Scherrer Institut

Ein Myonenexperiment wird vorbereitet.



# Inhalt

- 4 90 Sekunden über Neutronen und Myonen
- 6 Energie und Transport
  - 6 Das Innenleben einer Batterie
  - 6 Effiziente Motorräder
  - 7 Turbinenschaufeln im Test
- 8 Erde und Umwelt
  - 8 Pappeln für ein sauberes Erdreich
  - 8 Wasser in Tonböden
  - 9 Wie Pflanzen Wasser horten
- 10 Ernährung, Gesundheit und Medizin
  - 10 Das geheime Leben der Luftblasen
  - 10 Rezept für eine gesunde Ernährung
  - 11 Wenn Medizin die Natur kopiert
- 12 Die Neutronenleiterhalle der SINQ
- 14 Kulturgüter von gestern und heute
  - 14 Ein Beil aus der Bronzezeit
  - 15 Wie Gebäude unter Salz leiden
- 16 Elektronik und Technologie
  - 16 Spintronik
  - 16 Die Vermessung magnetischer Domänen
  - 17 Ein molekulares Sandwich
- 18 Neuartige Materialien
  - 18 Mikrogele
  - 19 Intelligente Materialien entstehen
  - 19 Supraleiter verstehen
- 20 Schnittstellen zur Industrie
  - 20 Hochschulen, Unternehmen und das PSI
  - 21 Problemlösungen für die Industrie
  - 21 Neue Technologien
  - 21 Spin-off-Unternehmen
  - 21 Eine neue Neutronenquelle für Europa
- 22 Die Experimentierhalle mit der Myonenquelle SμS
- 24 Anwendungen für Neutronen und Myonen
  - 25 Was ist ein Neutron?
  - 25 Was ist ein Myon?
- 26 Neutronen und Myonen erzeugen
  - 26 Beschleunigte Protonen
  - 26 Neutronen freisetzen
  - 26 Myonen erzeugen
- 28 Wir machen's möglich
- 31 Das PSI in Kürze
  - 31 Impressum
  - 31 Kontakte

## Titelbild

Mithilfe von Neutronen und Myonen können sich Forschende den detaillierten Aufbau von Materialien anschauen. Sie sehen, wie darin einzelne Atome zueinander angeordnet sind und wie sie sich verhalten.



# 90 Sekunden über Neutronen und Myonen

Das Paul Scherrer Institut PSI ist das grösste Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften in der Schweiz. Gleich drei Grossforschungsanlagen sind hier untergebracht: die Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ, die Schweizer Myonenquelle SμS und die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS.

An diesen Grossanlagen können Forschende detaillierte Untersuchungen an unterschiedlichen Materialien und Werkstoffen vornehmen. In ihren Experimenten machen sie sogar mikroskopische Atombewegungen sichtbar. Zusammen mit den von aussen sichtbaren Materialeigenschaften liefern sie so ein umfassendes Bild ihrer Proben.

Die Annehmlichkeiten unseres modernen Lebens sind durch jahrzehntelange Forschung und Entwicklung entstanden; ohne die Leistung von Wissenschaftlern und Ingenieuren wären sie undenkbar. Durch ihre Experimente entdecken sie mögliche Anwendungen für natürliche und künstliche Materialien.

Moderne Materialien und Werkstoffe begegnen uns überall: in ultraleichten Fahrrädern, sparsamen Autos, Mobiltelefonen, chirurgischen Implantaten, Niedrigenergie-Häusern, sogar in den Lebensmitteln im Supermarkt und noch in vielem mehr.

Am PSI werden Neutronen- und Myonenstrahlen zur Materialuntersuchung eingesetzt. Diese Strahlen entstehen, wenn schnelle Protonen auf einen Block aus Blei oder Kohlenstoff geschossen werden. Der Protonenbeschleuniger erzeugt hierfür den weltweit leistungsstärksten Protonenstrahl – hier zeigt sich Schweizer Ingenieurskunst in Bestform.

Neutronen sind natürliche und allgegenwärtige Teilchen. Zusammen mit Protonen

und Elektronen sind sie die Grundbausteine jeglicher Materie auf der Erde: Diese drei Elementarteilchen sind die Zutaten aller Atome. Dabei sitzen Neutronen und Protonen besonders eng beieinander; sie bilden den Kern eines jeden Atoms.

Auch Myonen sind Elementarteilchen, allerdings werden sie weit weniger zu Forschungszwecken genutzt: In die mikroskopischen Lücken zwischen den Atomen eingebaut, lassen sie sich als winzige Sonden nutzen, die ihre atomare Umgebung vermessen. Myonen sind, wie Elektronen und Protonen, elektrisch geladen. Bezüglich ihres Gewichts liegen sie zwischen den beiden: Sie sind schwerer als Elektronen, aber leichter als Protonen.

Mehr als 2500 Forschende aus der Schweiz und der ganzen Welt reisen jedes Jahr ans PSI. Viele von ihnen nutzen die intensiven Strahlen aus Neutronen und Myonen, um Materialproben zu untersuchen und deren mikroskopische Eigenschaften zu entschlüsseln.

So bringt die Forschung am PSI die Wissenschaft jeden Tag ein Stück weiter voran. Und neben theoretischen Erkenntnissen gibt es auch etlichen praktischen Nutzen: Regelmässig helfen PSI-Ergebnisse, Industrieprozesse zu optimieren.

Mehr über die Neutronen- und Myonenforschung am PSI lesen Sie auf den folgenden Seiten.

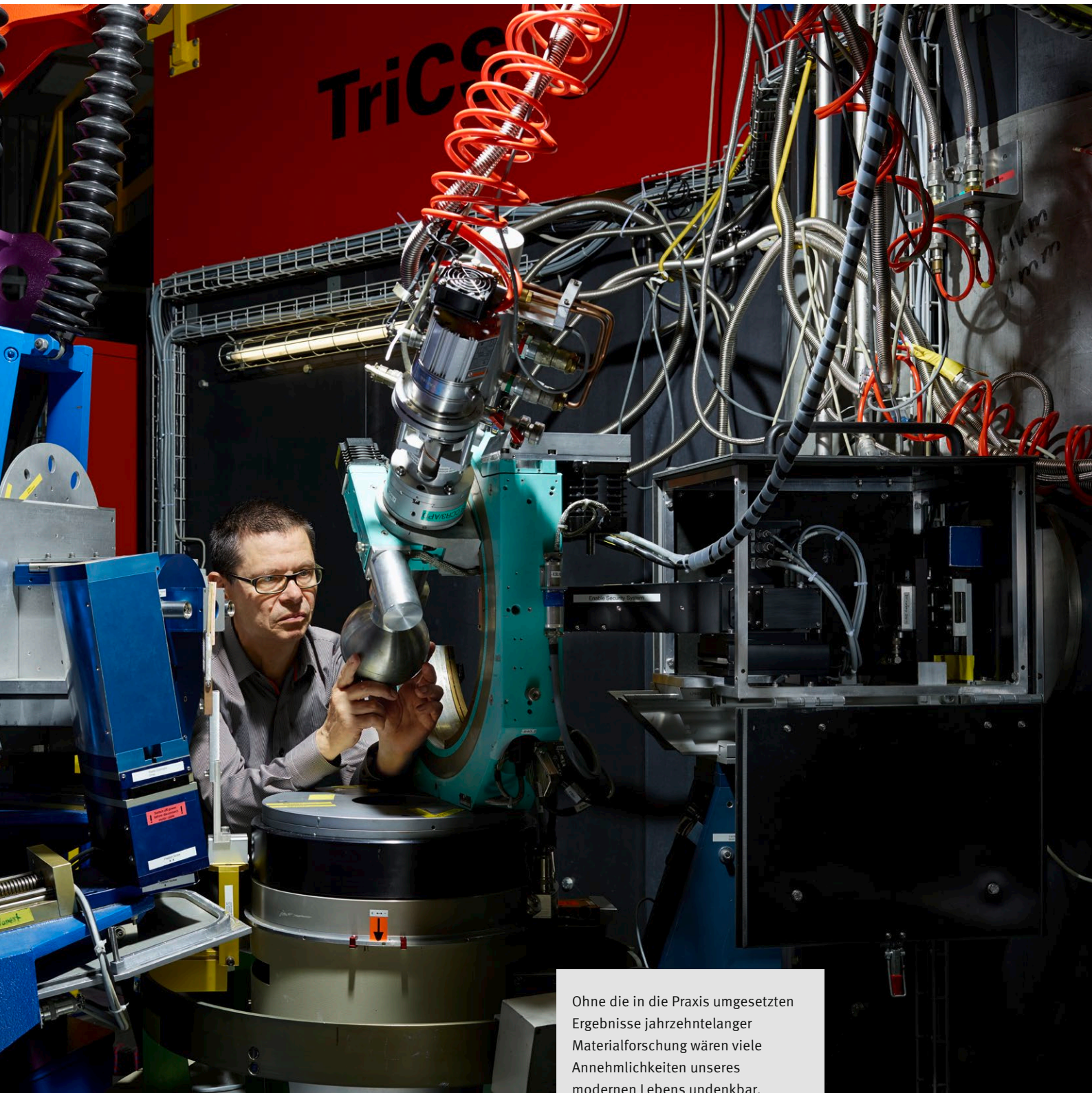
<http://psi.ch/ZTvQ>



<http://psi.ch/CGgA>







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



# Energie und Transport

**Angesichts eines ständig wachsenden Energiebedarfs sind Methoden zum effizienteren Verbrauch von Energie zunehmend gefragt. Auch die Neutronen- und Myonenstrahlen des PSI leisten ihren Beitrag zu dieser Energieforschung.**

## Das Innenleben einer Batterie

Von Kinderspielzeug über Laptops bis hin zu Elektroautos: Wiederaufladbare Batterien – auch Akkus genannt – stecken heutzutage in vielen elektrischen Geräten. Einst waren Nickel-Metallhydrid-Akkus noch Kuriositäten aus dem Labor. Doch in den letzten 20 Jahren neu entwickelte Materialien erlauben inzwischen, sie viele Male neu aufzuladen. Die Entwicklung von Batterien ist ein Forschungsfeld, für das Hersteller regelmäßig die Neutronen- und Myonenstrahlen am PSI nutzen.

Ein typischer Nickel-Metallhydrid-Akku vom Typ AA ist ein komprimiertes technisches Wunder, das in jede Hosentasche passt.

Das Innenleben eines solchen Akkus besteht aus zwei unterschiedlich geladenen Metallstreifen, die durch eine isolierende Folie voneinander getrennt sind. Diese drei Schichten werden zusammen aufgerollt und in das metallene Batteriegehäuse gepackt. Das Gehäuse wird mit einer elektrisch leitenden Flüssigkeit aufgefüllt und mit einem Deckel verschlossen.

Der positive der beiden Metallstreifen besteht aus einer Nickelverbindung, der negative aus sogenanntem Metallhydrid. Wird der Akku geladen, so setzen chemische Reaktionen den Wasserstoff aus dem Nickel frei, er wird vom Metallhydrid aufgenommen. Wird der Akku anschließend benutzt, laufen diese Reaktionen

umgekehrt ab, und es fließt ein elektrischer Strom.

Mit Neutronenstrahlen kann man in eine Batterie hineinblicken und in Echtzeit verfolgen, was während des Lade- und Entladeprozesses in den einzelnen Bauteilen geschieht. Einzigartige Einblicke in die Betriebsleistung des Akkus werden so möglich. Mit Myonenstrahlen lässt sich sogar die Bewegung der Chemikalien innerhalb der Batterie verfolgen.

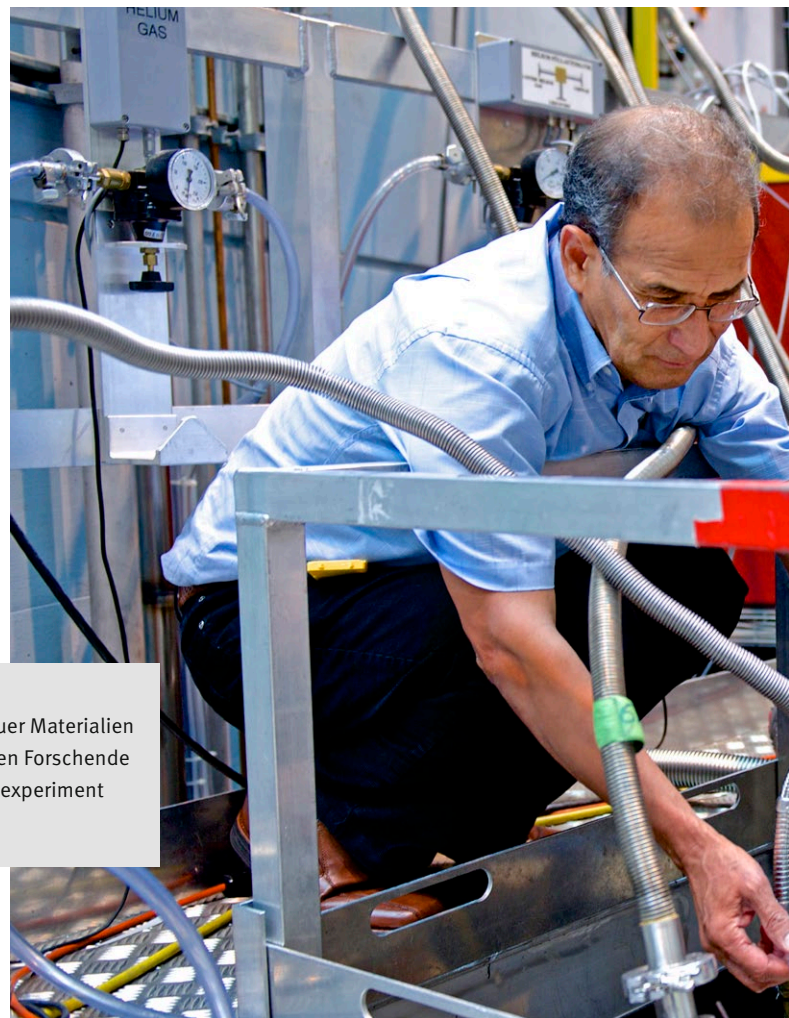
Beispielsweise lässt sich beobachten, wie das Volumen des Metallhydrids minimal zunimmt, während es den Wasserstoff aufnimmt. Bei hochwertigen kommerziellen Materialien verläuft diese Volumenänderung gleichmässig und umkehrbar. Zeigt dagegen ein potenzielles neues Batteriematerial einen plötzlichen Sprung in dieser Volumenzunahme,

erweist es sich dadurch als ungeeignet. Solche sprunghaften Änderungen würden ein reibungsloses Funktionieren des Akkus behindern, besonders wenn er viele Male aufgeladen und entladen wird.

## Effiziente Motorräder

Neutronenstrahlen durchdringen Metall beinahe ungehindert. Diese Eigenschaft machten sich die Entwickler einer ölgeschmierten Motorkupplung zunutze. Zu ihrer Überraschung zeigte sich, dass einige der Kupplungsscheiben nicht ordentlich vom Öl benetzt wurden. Anlass, das Kupplungsdesign nochmals zu überarbeiten.

Höhere Effizienz, geringere Emissionen und eine grössere Reichweite mit einer



Zur Erforschung neuer Materialien für Batterien bereiten Forschende ein Neutronenstreuexperiment vor.



Tankfüllung: Ingenieure in der Motorradentwicklung stehen unter ständigem Druck, den Treibstoffverbrauch ihrer Motoren zu senken. Auch die Ölpumpe muss modernen Ansprüchen genügen, denn sie ist einer der grössten Energieverbraucher im Motor. Ihre Hauptaufgabe ist es, die Kupplung des Motorrads zu schmieren und zu kühlen.

Die Kupplung überträgt Kraft und Bewegung vom Motor auf die Räder. Üblicherweise besteht sie aus einer Reihe aneinandergepresster Scheiben, die immer dann auseinandergezogen werden, wenn der Gang gewechselt werden soll.

Die Bildgebung mit Neutronenstrahlen ermöglicht einen Blick in das Innere des Kupplungsgehäuses und macht sichtbar, welche Teile geölt sind und welche nicht. Dank kürzester Aufnahmezeiten von nur 50 Millionstelsekunden gelingt dies, selbst während der Motor mit 8000 Umdrehungen pro Minute läuft.

In einem Projekt untersuchten Ingenieure eine Kupplung, die mit geringerer Ölmenge und somit schwächerer Pumpleistung auskommen sollte. Das Öl gelangt hier durch ein Loch in die Antriebswelle, läuft durch die Kupplung und soll sich

zuletzt über acht drehende Scheiben verteilen.

Doch die Neutronenstrahl-Aufnahmen offenbarten, dass nur die ersten drei der acht Scheiben vom Öl benetzt wurden. Dieses unerwünschte Ergebnis zeigte sich unabhängig von der Drehzahl des Motors und der Leistung der Ölpumpe.

Bei ihrem nächsten Design konnten die Ingenieure die Ölführung so anpassen, dass nun alle Kupplungsteile trotz geringerem Ölfluss gut gekühlt und geschmiert werden.

<http://psi.ch/DLPR>



## Turbinenschaufeln im Test

**Das rotierende Herzstück eines Kraftwerks ist seine Turbine: Sie wandelt die Energie von heissem Gas zunächst in eine Drehbewegung und schliesslich in elektrische Energie um. Dabei geht es heiss zu: Manchmal werden 90 Prozent der Schmelztemperatur der Turbinenschaufeln erreicht. Forschende versuchen zu**

**verstehen, wie diese zermürbenden Zustände dem Turbinenmaterial zusetzen. Das Ziel ist eine höhere Effizienz der Kraftwerke und gleichzeitig Zuverlässigkeit über viele Jahre.**

In Gasturbinen herrschen gewaltige Zustände: Brüllend heisses Gas von 1400 Grad Celsius strömt durch Turbinenschaufeln, die mit bis zu 3600 Umdrehungen pro Minute im Kreis sausen und dabei selbst 1000 Grad heiss werden.

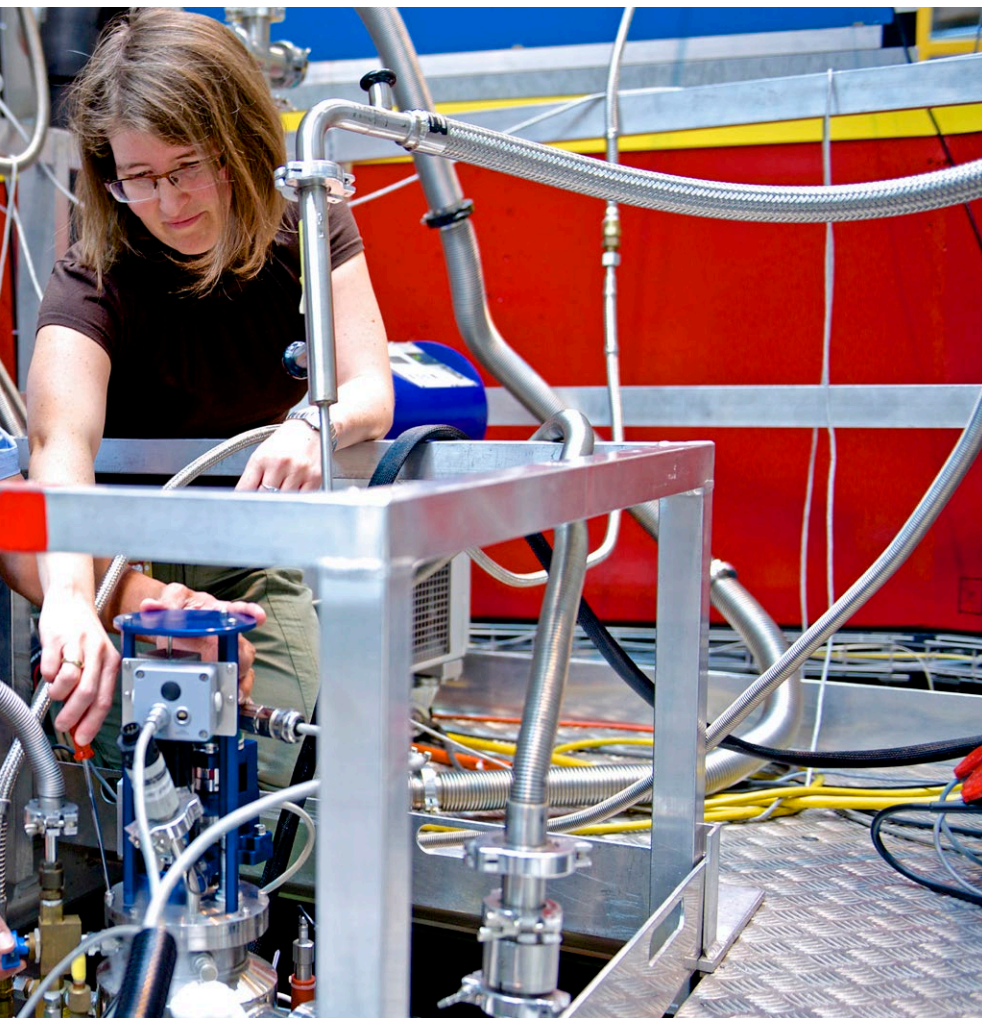
Das Material der Turbinenschaufeln muss diesen extremen Belastungen gewachsen sein. Mögliche Werkstoffe durchlaufen daher umfassende Prüfverfahren. Zudem arbeiten Ingenieure kontinuierlich daran, Material und Bauweise der Turbinenschaufeln zu verbessern, um Kraftwerke effizienter zu machen.

Für ihre Untersuchungen nutzen sie auch Neutronenstrahlen. Mit diesen lassen sich die Schaufeln und andere Bauteile der Turbine unter Last durchleuchten. Die Ingenieure suchen dabei nach Zusammenhängen zwischen dem makroskopischen Materialverhalten und seinem mikroskopischen Aufbau. Auch Spannungen im Material, die vom Herstellungsprozess herrühren, lassen sich so vermessen. Solche Restverspannungen sind ein schwerwichtiges Problem in den Bauteilen, da sie zu Rissen und anderen unvorhersehbaren Veränderungen im Werkstück führen können.

Das PSI ist weltweit eines der führenden Institute im Bereich der Spannungsvermessung mit Neutronenstrahlen. Firmen aus der ganzen Welt schicken daher ihre Ingenieure regelmässig für Materialuntersuchungen hierher.

In einer kürzlich durchgeführten Studie haben Forschende Veränderungen in der Mikrostruktur einer neu entwickelten Turbinenschaufel auf das Gussverfahren, mit dem die Schaufel hergestellt wird, zurückführen können. Die Ergebnisse solcher Neutronenexperimente dienen dazu, den Herstellungsprozess und das Design der Bauteile zu optimieren. Das Ergebnis sind Turbinenschaufeln, die extrem langlebig sind und zugleich die Effizienz der Kraftwerke steigern.

<http://psi.ch/fi5n>



# Erde und Umwelt

**Viele Pflanzen und Tiere haben sich perfekt an ihre Umwelt angepasst. Ihre Strategien können wir nachahmen und damit auch unseren ökologischen Fussabdruck reduzieren.**

## Pappeln für ein sauberes Erdreich

**Das chemische Element Bor ist eines der leichtesten überhaupt. In geringer Konzentration ist es für Pflanzen ein wichtiger Nährstoff. Im Übermass dagegen ist es schädlich; in der Landwirtschaft leidet dann die Ernte. Neutronenexperimente haben gezeigt, dass Pappeln 20-mal so viel Bor aufnehmen können wie andere Pflanzen. Neben Felder gepflanzt, tragen daher Pappelbäume dazu bei, den Borgehalt auf ein gesundes Mass zu senken.**

Plötzlich trugen in der Türkei die Zitrusbäume weniger Früchte. Die Ursache fand sich im Abwasser von Kraftwerken, das einen hohen Borgehalt aufwies und in die Flüsse geleitet worden war. In Kalifornien ging es der gesamten Landwirtschaft ähnlich, auch wenn die Ursache hier eine natürliche war: Dürre und Felsverwitterung entlang der Küste hatten zur Anreicherung mit Bor geführt.

Mit Neutronenstrahlen lässt sich der Borgehalt von Pflanzen recht einfach ermitteln. In einer Studie verglichen Forschende, wie viel Bor Pappeln, Weiden, Brauner Senf und Lupinen aufnehmen konnten. Es zeigte sich, dass Pappeln am meisten Bor vertrugen und Weiden am wenigsten. Ein überraschendes Ergebnis, da Pappeln ebenso wie Weiden zur Familie der Weidengewächse gehören.

Innerhalb der Pappelblätter fanden die Forschenden die höchsten Bor-Anreicherungen an den Blatträndern und -spitzen. Mit steigendem Borgehalt verloren die Blattränder ihre Farbe und Teile des Blat-

tes starben ab. Erstaunlicherweise konnten die Blätter jedoch selbst dann noch Bor aufnehmen und es in den abgestorbenen Flecken anreichern. Auf diese Weise schirmt die Pappel die gesunden Blattteile vom Gift ab. Dank dieses Kniffs ertragen die Bäume 20-mal höhere Borkonzentrationen als andere Pflanzen.

Pappeln an den Ackerrändern bieten daher in Gebieten mit schlechter Wasser- und Bodenqualität eine gute Möglichkeit, die Nutzpflanzen zu schützen. Damit das Bor von dort nicht zurück ins Erdreich gelangt, sollten die Pappeln nach einiger Zeit gefällt werden. Das Holz kann als Bau- oder als Feuerholz verwendet werden.

## Wasser in Tonböden

**Über Jahrhunderte wurden Abfallgruben oder Wasserspeicher mit Ton ausgekleidet, denn dieses natürliche Material ist so gut wie undurchlässig. Heutzutage untersuchen Forschende die mikroskopische Struktur von Ton, um zu ergründen, wie Wasser langsam hindurchwandert. Ihre Erkenntnisse sollen helfen, ein Tiefenlager für radioaktive Abfälle zu finden.**

Tief unter der Erde sollen sie schlummern. Radioaktive Abfälle – da sind sich weltweit viele Experten einig – sollen in geeigneten Bodenschichten abklingen. In Belgien, Frankreich und der Schweiz werden hierfür tief unter der Erde liegende Tonformationen in Betracht gezogen. Schweden und Finnland, Länder in denen es solche Tonformationen nicht gibt, prüfen Gesteine, mit tonbasierten Auskleidungen. Um zu entscheiden, welche Gesteinsschichten für radioaktive Tiefenlager am besten geeignet sind, ist es also unerlässlich, die Eigenschaften von Ton genau unter die Lupe zu nehmen.



Pflanzen werden durch Neutronenstrahlen nicht geschädigt. Deshalb kann man von Ihnen 3-D-Aufnahmen machen, die auch die im Boden verhafteten Wurzeln zeigen.

Ton setzt sich aus Schichten kleiner, plättchenförmiger Teilchen zusammen, die von einem Netzwerk dünner Wasserschichten und Poren verschiedener Grösse durchzogen sind.

Durch eine Kombination aus Neutronenstrahlexperimenten und Messungen der Wasserdurchlässigkeitsrate lässt sich das Poren-Netzwerk besser verstehen. Die Messungen machen es sogar möglich, auf kleinster Skala zu verfolgen, wie sich das Wasser durch den Ton hindurchquetscht.





Tonböden, die für radioaktive Tiefenlager geeignet sein könnten, umfassen das nicht quellfähige Kaolin – auch als Porzellanerde bekannt und tatsächlich für die Porzellanherstellung verwendet – sowie Betonit, das reichlich Montmorillonit enthält. Letzteres dehnt sich aus, wenn es nass wird, und kann auf diese Weise sein mehrfaches Trockengewicht an Wasser aufnehmen.

Experimente am PSI haben gezeigt, dass Montmorillonit Wasser am besten aufhält. Diese neue mikroskopische Einsicht wird nun in Computersimulationen eingehen, die helfen sollen, die Wasserdurchlässigkeit potenzieller Endlager vorherzusagen.

## Wie Pflanzen Wasser horten

**Wer kann schon Pflanzenwurzeln beim Wachsen zusehen? Mit einem Neutronenstrahl wird genau das möglich. Der Neutronen-Blick durch das Erdreich offenbart genauestens, wie sich Wasser um das Wurzelgeflecht herum anreichert.**

Neutronen sind ein so empfindliches Messinstrument, dass Forschende selbst lebende Pflanzen schadlos einem Neutronenstrahl aussetzen können. So lassen sich 3-D-Bilder der Pflanzenwurzeln erstellen, während die Pflanze wächst.

Neutronenstrahl-Aufnahmen haben ergeben, dass die Pflanzenwurzeln das Erdreich in ihrer unmittelbaren Umgebung verändern: Es enthält deutlich mehr Wasser. Die Pflanze legt hier offenbar einen Wasservorrat für spätere kurze Dürreperioden an. Diese Erkenntnis hilft Forschenden, Nutzpflanzen zu züchten, die besser an trockene Regionen angepasst sind.

<http://psi.ch/NmMb>



# Ernährung, Gesundheit und Medizin

**Gute Ernährung, Gesundheit und ein hoher Standard in der Medizin sind wichtige Zutaten für ein sorgloses Leben. Experimente mit Neutronenstrahlen leisten auch dazu einen Beitrag.**

## Das geheime Leben der Luftblasen

**Speiseeis, Mousse au Chocolat und Schlagsahne sollen lecker schmecken und gut aussehen, und das noch Tage, nachdem sie im Supermarkt gekauft wurden. Neutronen ermöglichen Lebensmittelherstellern einen mikroskopischen Blick ins Innere und lassen sie die beste Zusammensetzung für köstliche Milchprodukte entwickeln.**

Sie bestehen nur aus wenigen Zutaten. Und doch sind Milchprodukte in ihrem Aufbau und ihrer Chemie erstaunlich komplex.

Die Grundzutaten von Speiseeis, Schlag- und Sprühsahne, Cremespeisen, Joghurt und Co. sind Wasser (oder Eiskristalle), Milchfett für eine geschmackliche Fülle und um die Mischung zu stabilisieren, und schliesslich Zucker, der neben Geschmack auch die Konsistenz verbessert. Der billigste Zusatzstoff dieser Produkte steht jedoch auf keiner Zutatenliste: Es ist Luft. In Form winziger Luftpolster hat sie eine entscheidende Auswirkung auf Textur und Volumen von Milchspeisen.

Emulgatoren werden den Milchprodukten zugesetzt, um die Zutaten zu binden und um die Luftbläschen zu stabilisieren. Ein weit verbreiteter Emulgator ist Ei, obwohl oft auch Monoglyceride, Diglyceride und andere Mittel verwendet werden.

Ein Bläschen ist nichts anderes als Luft, die von einer hauchdünnen Hülle aus Wasser umgeben ist. Ein Emulgator stabilisiert dieses Gefüge, indem die Emulgatormoleküle sowohl die Innen- als auch die Aussen-seite der Wasserhülle überziehen.

Den Lebenszyklus fragiler Luftbläschen zu untersuchen, ist für Forschende nicht gerade eine Routineaufgabe. Doch mit den Neutronenstrahlen am PSI lassen sich die molekularen Strukturen selbst dieser Gebilde ablichten.

Die Erkenntnisse aus diesen Messungen ermöglichen Lebensmittelherstellern, die Mischung ihrer Zutaten zu optimieren, bevor sie eine neue Grossproduktion starten.

## Rezept für eine gesunde Ernährung

**Wer sich gesund ernähren möchte, meidet oft fette Speisen um jeden Preis. Allerdings ist nicht jedes Fett ungesund. Forschende am PSI untersuchen, wie verschiedene Fette vom Körper verdaut werden. Mit diesem Wissen könnten kalorienärmere Rezepte kreiert werden.**

Massvoll genossen ist Fett ein wichtiger Teil einer ausgewogenen Ernährung. Es liefert essenzielle Fettsäuren, die unser Körper nicht selber herstellen kann. Fett hilft uns, Vitamine aufzunehmen und spielt darüber hinaus eine wichtige Rolle für ein gesundes Gewebe, eine gute Haut und ein starkes Immunsystem.

Fette dienen zudem als Geschmacksträger und verleihen dem Essen eine besondere und variationsreiche Konsistenz. Cremiger Frischkäse, weicher Rührkuchen oder knusprige Chips – Fett ist bei allen eine entscheidende Zutat.

Unsere Verdauung knackt die grossen Moleküle in den Speisen, sodass Energie frei wird und die kleineren Bausteine leichter vom Körper aufgenommen werden können. Beispielsweise erkennt die Magensäure die Oberflächenstruktur von Fetttropfchen, dockt an diese an und zerstäubt sie in immer kleinere Tröpfchen, bis sich diese verdauen lassen.

Zu viel Fett kann jedoch zu Übergewicht und damit verbundenen Gesundheitsproblemen führen.

In einem Experiment haben Forschende am PSI die saure Umgebung des Magens nachgeahmt und Neutronenstrahlen genutzt, um Molekül für Molekül zu verfolgen, wie die Säure dem Fett zusetzt. Es zeigte sich, dass Fetttropfchen, die eine pflanzliche, zelluloseähnliche Beschichtung hatten, der Säure widerstanden und darum nicht vom Körper absorbiert wur-



Mit Neutronenstrahlen kann man auch die molekularen Strukturen von geschäumten Lebensmitteln sichtbar machen.



den. Versteckt man Fett auf diese Art vor dem Körper, lassen sich möglicherweise höchst wohlschmeckende Gerichte erschaffen, die dennoch nicht auf Bauch und Hüften gehen.

## Wenn Medizin die Natur kopiert

**Forschende haben winzige künstliche Partikel geschaffen, die wie natürliche Proteine wirken. Sie könnten genutzt werden, um biologische Sensoren herzustellen oder um Medikamente gezielt an die gewünschten Wirkorte im Körper eines Patienten zu transportieren.**

Proteine sind grosse biologische Moleküle, die im Körper eine grosse Bandbreite von Aufgaben übernehmen. Sie

helfen bei chemischen Reaktionen, sie kopieren die DNA und sie bringen Moleküle von einem Ort zum anderen.

Auf biologischer Grössenskala erscheinen sie zwar vergleichsweise gross. Und doch sind sie noch immer viel zu klein, als dass wir sie mit blossen Auge sehen könnten: Selbst tausend Proteine aneinandergereiht erreichen nur den Durchmesser eines Staubpartikels.

Von natürlichen Proteinen inspiriert haben Forschende ein einfaches Rezept entwickelt, um künstliche Proteine herzustellen. Experimente am PSI belegen, dass letztere sich tatsächlich ähnlich verhalten wie ihre echten Pendanten.

Die Form von Proteinen ist für ihre Funktion sehr wichtig. Wie Schlüssel im Schloss werden sie an bestimmten Stellen im Körper über ihre äussere Form erkannt. Die kugelförmigen, künstlichen Proteine sind so gebaut, dass sie sich

unter bestimmten Umständen auffalten. In ihrem Inneren sollen lokal wirksame Medikamente transportiert werden, die erst frei werden, wenn das künstliche Protein sich am Zielort öffnet.

In einem Experiment mit Vitamin B9 – auch bekannt als Folsäure – konnten die Forschenden das Vitamin erfolgreich über mehrere Stunden hinweg verfolgen. Es soll sonnengeschädigte Haut heilen.

Die künstlichen Moleküle lassen sich auch auf einem Siliziumchip anbringen, sodass ein hoch spezifischer biologischer Sensor entsteht. Medizinische Labore könnten diese Sensoren nutzen, um in Körperflüssigkeiten die Anwesenheit charakteristischer Moleküle zu testen und so wiederum auf bestimmte Krankheiten zu schliessen.





# Die Neutronenleiterhalle der SINQ







ORION

RITA II  
SHUTTER

CLOSE

12



# Kulturgüter von gestern und heute

Neutronenstrahlen sind perfekt geeignet, um wertvolle Gegenstände zu durchleuchten. Sie hinterlassen nicht einmal Kratzer und können doch tief ins Innere des Werkstücks blicken. Wer also ein Beil aus der Bronzezeit untersuchen oder die Zersetzung von Steinskulpturen erforschen möchte, reist dafür ans PSI.

## Ein Beil aus der Bronzezeit

Vor knapp 200 Jahren wurde in der Nähe des Thunersees ein prähistorisches Beil gefunden. Nun haben es Forschende am PSI untersucht und festgestellt: Das Zentraleuropa der Bronzezeit war stark beeinflusst von den Kulturen des Balkans und des Kaukasus.

Die Stadt Thun im Jahr 1829: Im Stadtteil Buchholz legen Kiesarbeiter einen Schatz aus der Frühen Bronzezeit frei. Hier, am Südhang des Renzenbühl-Hügels, finden sie einen kleinen prähistorischen Friedhof. Einer der Toten muss einst eine wichtige Person gewesen sein, denn in seinem Steinkistengrab liegen wertvolle Gegenstände. Darunter ein Beil, das seinesgleichen sucht.

Die Klinge des Beils besteht aus Bronze. Auf ihren beiden Seiten ist ein breiter Zierstreifen aus Kupfer eingearbeitet. In diese beiden Streifen sind wiederum 198 kleine Rauten aus Gold eingelassen, die zweireihig angeordnet sind. Eine solche Verzierung ist in Beilen aus der Frühen Bronzezeit extrem selten. Nur sieben bronzezeitliche Artefakte mit Ausschmückungen dieser Art wurden bisher nördlich der Alpen gefunden.

Das Beil gehört aufgrund seiner typischen Form zu den sogenannten Löffelbeilen. Diese werden oft in der westlichen Schweiz gefunden. Nicht erhalten geblieben ist der vermutlich lange, hölzerne Stiel. Die stark gekrümmte Schneide lässt darauf schliessen, dass das Beil vermutlich Waffe oder Statussymbol war und

weniger dazu diente, Holz zu bearbeiten. Das Beil wurde auf etwa 1800 v. Chr. datiert und damit auf die Stufe A2a der Frühen Bronzezeit.

Ein solch geschichtsträchtiges Objekt erfordert besondere Untersuchungsmethoden. Neutronen sind hierfür bestens geeignet, denn sie durchdringen Metall und bieten eine völlig zerstörungsfreie Analyse.

Die durchgeführte Bildgebung mit Neutronen liess darauf schliessen, wie das Beil hergestellt wurde. Die Bronze der Klinge zeigt etliche Luft einschüsse. Dies legt nahe, dass die Gussform für die Klinge aus Lehm gefertigt worden war. Das darin enthaltene Wasser muss im Kontakt mit der heissen, flüssigen Bronze verdampft sein und diese Hohlräume geformt haben. Und noch etwas lässt sich ableiten: Dass diese Hohlstellen kugelförmig anstatt länglich verformt sind, legt nahe, dass die Klinge nur gegossen und nachträglich kaum oder gar nicht geschmiedet wurde.

Für die goldenen Einlegearbeiten schnitt der prähistorische Kunsthandwerker zunächst von einem Goldstab kleine Scheibchen ab und hämmerte sie dann in zuvor ausgestanzte Vertiefungen in den Kupferstreifen. Ganz ähnlich wurden die Kupferstreifen in vorbereitete Mulden der gegossenen Bronzeklinge gehauen. Zum Abschluss wurde die gesamte Oberfläche einheitlich glattgeschliffen.

Die Untersuchung dieser prähistorischen Axt am PSI hat ein besseres Verständnis der Herstellungsmethoden während der Bronzezeit hervorgebracht. Die Forschenden konnten dank dieser Ergebnisse ermitteln, dass Zentraleuropa während der Bronzezeit weniger stark als bisher gedacht von der Mittelmeerkultur beeinflusst war. Grössere Vorbilder waren offenbar die Kulturen der Balkanhalbinsel und der Kaukasusregion.

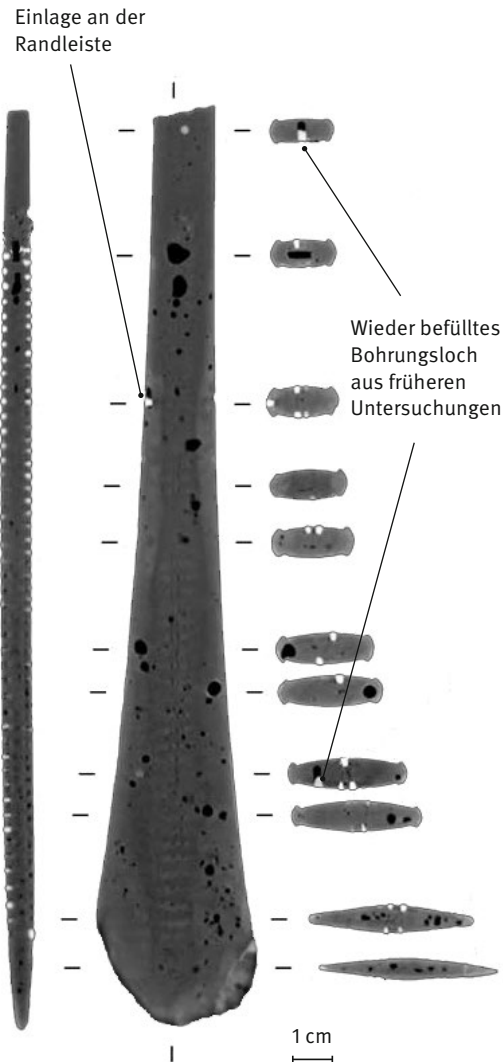
<http://psi.ch/46f3>







5 cm



**Links:** Das Bronze-Beil aus dem Bestand des Bernischen Historischen Museums.

**Rechts:** Mit Neutronentomografie erzeugte Bilder vom Inneren des Bronze-Beils. Abgebildet sind virtuelle Schnitte durch das Beil. Die Gaseinschlüsse sind als dunklere Bereiche zu sehen, die Goldverzierungen sind als helle Punkte erkennbar.

## Wie Gebäude unter Salz leiden

Kalkstein wird häufig für Gebäudefassaden und Skulpturen benutzt. Doch Salzwasser durchdringt und nagt an dem porösen Stein.

Gebäude und Skulpturen aus porösem Gestein sind machtlos gegen Salz. Letzteres kann viele Ursachen haben: Offensichtliche wie winterliches Streusalz oder Hochwasser, das bei Überflutung in die Städte dringt. Doch auch Rinder, Fledermäuse und Tauben, die im und um die Gebäude leben, bringen den Stein durch ihre Ausscheidungen mit Salz in Kontakt. Im Wasser gelöstes Salz sickert in die Gesteinsritzen und -poren. Trocknet dann der Stein wieder, bleibt das Salz zurück und formt Kristalle. Mit der Zeit verursachen diese Kristalle grosse Verspannungen im Stein, die schliesslich zu Rissen und Absplitterungen führen.

Bauingenieuren steht seit Kurzem ein neues Computerprogramm zur Verfügung, mit dem sie Gebäudereparaturen, Restaurationen oder neue Baumaterialien zunächst simulieren können. Dadurch sind Langzeitstudien am echten Material nicht mehr nötig.

Die theoretischen Vorhersagen des Computerprogramms wurden anhand von Neutronenstreuexperimenten an Savonnières-Kalkstein überprüft. Die Bildgebung mit Neutronenstrahlen macht nicht nur Wasser und gelöstes Salz im Gestein sichtbar, sondern auch Salzkristalle und Risse. Ein entscheidendes Ergebnis war, dass die wesentlichen Beschädigungen erst dann geschehen, wenn der Stein abermals nass wird.

Die Softwareentwickler erwarten, dass das Programm in ganz Europa zur Anwendung kommen wird. So könnten die Bau- und Betriebskosten von Gebäuden gesenkt und die Lebensdauer von Materialien und Strukturen verlängert werden.

# Elektronik und Technologie

Überall begegnen und begleiten uns heute elektronische Geräte und magnetische Datenspeicher. Und sie werden ständig kleiner, während ihre Speicherkapazitäten steigen. Eine Herausforderung dieser technologischen Miniaturisierung liegt darin, Elektronik und Magnetismus auf neue Weisen zusammenzubringen.

## Spintronik

Spintronik ist das Schlagwort, das oft fällt, wenn es um die zukünftige Speicherung digitaler Daten geht. Der sogenannte Spin ist eine grundlegende Eigenschaft von Elektronen. Spintronik bedeutet, dass dieser Spin genutzt wird, um digitale Informationen zu verarbeiten. Wenn sich die Hoffnungen bewahrheiten, wird es dank Spintronik möglich sein, Elektrogeräte deutlich kleiner und zudem energiesparender zu bauen. Noch steckt das Gebiet der Spintronik in den Kinderschuhen. Um es voranzubringen, helfen die Neutronen- und Myonenstrahlen am PSI.

Seit nunmehr über hundert Jahren wandern Elektronen durch die Drähte unserer Zivilisation. Elektronen sind winzige Elementarteilchen. Sie haben eine bestimmte Masse und eine bestimmte, negative Ladung. Ihre dritte Eigenschaft, der Spin, ist dagegen weniger bekannt. Kurz gesagt, der Spin verleiht jedem einzelnen Elektron ein eigenes, winziges magnetisches Feld, das das Elektron umgibt.

Wenn man die Ausrichtung des Spins und damit des Magnetfeldes einzelner Elektronen kontrollieren kann, ist es möglich, viel mehr Daten auf viel kleinerem Raum zu speichern als bisher. Um jedoch einzelne Spins zu manipulieren, sind extrem hochspezialisierte Instrumente nötig. Organische Halbleiter sind eine neuartige Materialklasse und für Anwendungen in

der Spintronik gut geeignet. Genau wie klassische Halbleiter – hierzu zählt beispielsweise Silizium – können auch organische Halbleiter Elektrizität leiten und Licht ausstrahlen. Mit blossen Auge betrachtet ähneln sie jedoch eher Kunststoff und sind wie dieser leicht formbar.

Werden Myonen behutsam zwischen die Atome eines Spintronik-Bauteils eingebaut, können sie ihre unmittelbare Umgebung und den Spin der vorbeiziehenden Elektronen messen.

Auf diese Art ist es Forschenden gelungen, ein Gerät zu entwickeln, das die Spins aller Elektronen, die bei einem Material heraus- oder hineingelangen, vollständig kontrolliert.

Besonders bemerkenswert: Die Forschenden konnten zeigen, dass spintronische Geräte durchaus die Funktionen heutiger Computerprozessoren, Sensoren, digitaler Speicher und intelligenter Leuchtbildschirme übernehmen könnten.

<http://psi.ch/d8rP>



## Die Vermessung magnetischer Domänen

Datenspeicherung ist ein grosses Geschäft, das stetig weiter wächst. Erst kürzlich gab ein Festplattenhersteller bekannt, er habe in den letzten vier Jahren eine Milliarde Festplatten verkauft – ebenso viel, wie in den 29 Jahren davor. Die Herstellerfirmen sind dabei ständig bemüht, die Informationsmenge zu erhöhen, die von Speichermedien aufgenommen werden kann.

Die Welt der Computer besteht aus Nullen und Einsen. Fotos, Musik und Videos – alles lässt sich auf die Ebene dieser zwei Ziffern herunterbrechen und auf kleine, sich drehende magnetische Scheiben

bannen. Leicht erreicht eine solche Festplatte heutzutage ein Terabyte (1 TB) an Speicherkapazität.

Tatsächlich würde man aber mit keinem Mikroskop der Welt auf einer Festplatte die Ziffern Null und Eins sehen. Vielmehr stehen diese für zwei Zustände, die die kleinen magnetischen Domänen der Festplatte annehmen können: Der magnetische Nordpol zeigt entweder nach oben





oder nach unten. Ein winziger Lese- und Schreibkopf rast über die sich drehende Platte und speichert Daten ab, indem er die magnetischen Pole der Domänen ausrichtet.

Mit Neutronenstrahlen lässt sich sehr elegant verfolgen, wie die Pole der magnetischen Domänen umklappen.

Magnetische Domänen bestehen typischerweise aus einer Kobalt-Chrom-Platin-Legierung und sind durch dünne Filme aus Siliziumoxid voneinander getrennt. Die durchschnittliche Grösse der Domänen beträgt winzige 8 Nanometer – dies

entspricht in etwa dem millionsten Teil eines Sandkorndurchmessers. Die Domänen sind derart gestaltet, dass ihre Orientierung nicht selbständig umklappen kann. Nur der Schreibkopf kann dies bewirken.

Schon bald werden Festplatten mit 10 Terabyte Speicherplatz üblich sein. Und als weiterer Meilenstein stehen bereits 60 Terabyte in Aussicht.

Um so viel Information verlässlich auf eine Scheibe zu packen, sind neuartige magnetische Materialien nötig, beispielsweise Legierungen aus Eisen und Platin. Ausserdem muss man dafür sorgen, dass die Domänen nur unter Einfluss eines starken Magnetfelds umklappen.

Mit Neutronenstreuung lassen sich neue Legierungen unter die Lupe nehmen. So können Festplattenhersteller testen, ob potenzielle Materialien den Anforderungen der Zukunft genügen.

## Ein molekulares Sandwich

**Mit empfindlichen Instrumenten lassen sich Atome und Moleküle massgeschneidert aufeinander stapeln. Solche Sandwich-Strukturen haben oft völlig neue elektrische und magnetische Eigenschaften. Experimente geben Einblicke in diese faszinierenden Gebilde.**

Immer kleiner sollen heutzutage die elektronischen Bauteile werden. Doch was geschieht, wenn die Materialschichten nur noch wenige Atome dick sind? Dann kann es passieren, dass die Physik Kopf steht und nichtmagnetische Stoffe plötzlich doch magnetisch werden.

Bringt man beispielsweise ein manganhaltiges Oxid auf ein aluminiumhaltiges Oxid auf, bildet sich ein externes Magnetfeld an der Grenzfläche zwischen den beiden Komponenten.

Neutronen liefern einzigartige Einblicke in die Materiestruktur. Nur Neutronenstrahlen können quer durch die atomaren Schichten den Magnetismus abbilden. Im Fall der Mangan- und Aluminiumoxide stellten Forschende fest, dass die manganhaltige Schicht gegenüber ihrer natürlichen Form gedehnt und gequetscht war. Dies führte zu starken Verspannungen innerhalb der Struktur.

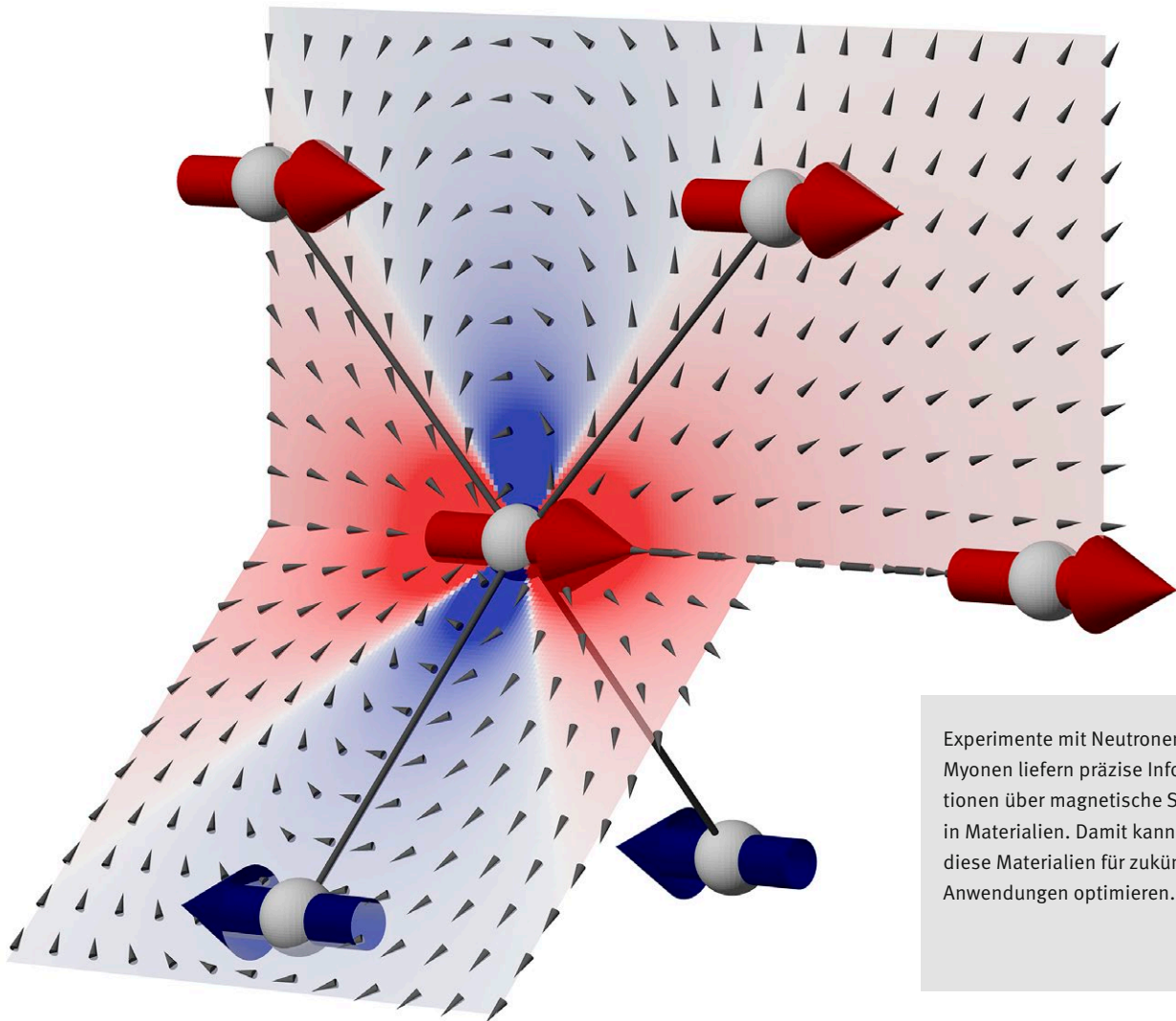
Weiter von der Grenzschicht entfernt nahmen sowohl die Verspannung als auch das Magnetfeld deutlich ab. Die Forschenden schliessen daraus, dass das Magnetfeld eine Folge der Verspannung ist.

Diese Forschung hat aufgezeigt, wie sich Magnetismus in Dünnschicht-Strukturen regulieren liesse. Bald könnten daraus neuartige elektronische Geräte hervorgehen.

In der Elektronik und bei der Datenspeicherung verlässt man sich auf das Zusammenspiel von Elektrizität und Magnetismus in winzigsten Bauteilen. Mit Neutronenstreuexperimenten kann man beobachten, wie dieses Zusammenspiel abläuft.



# Neuartige Materialien



Experimente mit Neutronen und Myonen liefern präzise Informationen über magnetische Strukturen in Materialien. Damit kann man diese Materialien für zukünftige Anwendungen optimieren.

Wissenschaftlicher Fortschritt und neue Technologien entstehen erst nach Aber-tausenden Experimenten. Neue Materi-alien müssen beispielsweise gründlich getestet werden, bis die besten unter ihnen in neue Anwendungen münden. Forschende müssen hier ihr Wissen und ihre Kreativität einsetzen.

## Mikrogele

Mikrogele sind kleine, weiche Teilchen mit einem festen Kern und einer flauschi-gen Oberfläche in einer wässrigen Lö-sung. Ihre geschmeidige Konsistenz macht die Gele für vielfältige Anwendun-gen interessant.

Sie erinnern an mikroskopische Wollknäuel. Und tatsächlich bestehen die Partikel eines Mikrogeles aus langen Po-

lymersträngen. Diese Knäuel reagieren auf ihre Umgebung: Bei Druck geben sie nach. Lässt der Druck nach, dehnen sie sich wieder aus.

Packt man die Partikel dicht zusammen, überlappen die flauschigen Oberflächen und verfilzen ineinander. Das führt zu Überraschenden neuen Eigenschaften des Mikrogeles.

Forschende am PSI haben die innere Struktur und die physikalischen Eigen-schaften der Mikrogele mit Neutronen-



strahlen untersucht. So fanden sie heraus, dass sich die Mikrogele über Druck besser manipulieren lassen als über die Temperatur: Packt man die Partikel nicht nur dicht zusammen, sondern quetscht sie stark, entweicht die Flüssigkeit aus ihnen, sie werden zu kompakten Einzelteilchen und verfilzen nicht mehr ineinander. Für Mikrogele finden sich mehr und mehr Anwendungen, sei es bei der Wasseraufbereitung, um künstliche Muskeln herzustellen oder als winzige Schalter und Ventile.

## Intelligente Materialien entstehen

**Manche Moleküle reagieren selbständig auf Licht oder Temperatur. Bettet man diese sogenannten aktiven Moleküle in neutrale Werkstoffe ein, lassen sich womöglich intelligente Materialien erschaffen. Einer der ersten Schritte ist es zu prüfen, ob die aktiven Moleküle auch in ihrer neuen Umgebung noch funktionieren.**

Medizinische Implantate, die langsam Arzneimittel freigeben. Lichtempfindliche Materialien, die in elektronischen Geräten eingesetzt werden könnten, um das Licht einer bestimmten Farbe zu blockieren oder zu verstärken. So und ähnlich lauten die Hoffnungen, die auf intelligenten Materialien ruhen. Diese bestehen nicht komplett aus aktiven Molekülen, sondern zum Grossteil aus neutralem Trägermaterial.

Ein solcher Trägerstoff sind Aerogele. Sie wurden bereits 1931 entdeckt und sind äusserst leicht, denn rund 99 Prozent ihres Volumens sind winzige Luftbläschen. Siliziumdioxid-Aerogele lassen sich aus Sand herstellen und sind die meistgenutzten Materialien in diesem Zusammenhang, da sie chemisch beständig und medizinisch unbedenklich sind. Für Arzneien sind sie somit das perfekte Trägermaterial.

Mit Neutronenstreuung können Materialentwickler ins Innere von intelligenten Materialien blicken und nachvollziehen, wie die aktiven Moleküle mit ihrem Trägerstoff interagieren.

Auf diese Art konnten Forschende zeigen, dass in einem intelligenten Material die aktiven Moleküle jeweils in den Poren des Aerogels sassen. Knapp 80 Prozent der Poren waren auf diese Art belegt und nie fand sich mehr als ein Molekül in einer Pore. Zudem reagierten die Moleküle unverändert auf die sie aktivierende Lichtstrahlung.

## Supraleiter verstehen

**Sie ist eine der grössten Entdeckungen des 20. Jahrhunderts: Supraleitung lässt Strom komplett verlustfrei fließen – solange die Temperatur niedrig genug ist. Doch wie Supraleitung genau funktioniert, ist bis heute ein Rätsel, das Physiker nicht komplett geknackt haben. Experimente mit Neutronen und Myonen am PSI sollen Forschenden den Schlüssel zur Erkenntnis liefern.**

Ein beinahe unheimliches Phänomen tritt in ganz gewöhnlichen Metallen wie Blei und Aluminium auf, wenn man sie sehr stark kühlt: Bei ungefähr 270 Grad Celsius unter null leiten sie plötzlich Strom ohne jeglichen Widerstand. Der Effekt wurde erst 1911 entdeckt und bekam den passenden Namen Supraleitung. Während jeder normale elektrische Leiter – hierzu zählt klassischerweise das Kupferkabel – durch den hindurchfliessenden Strom immer ein wenig warm wird und so ein kleiner Teil der Energie auf der Strecke bleibt, geschieht bei der Supraleitung nichts dergleichen.

Die erforderlichen tiefen Temperaturen werden meist durch Kühlung mit flüssigem Stickstoff oder flüssigem Helium erreicht. Unterhalb der sogenannten kri-

tischen Temperatur wird ein Kabel zum Supraleiter und kann dann mehr als das Hundertfache der Stromstärke führen, die ein gleich dickes Kupferkabel schafft. Supraleiter werden in medizinischen Magnetresonanztomografen, in Mobilfunk-Basisstationen als elektronische Filter und in manchen Stromnetzen nutzt man sie in Leitungen, die hohe elektrische Leistungen über kurze Strecken transportieren.

Einfache supraleitende Materialien sind bereits heute gut untersucht und verstanden. Doch werden unter neuartigen Materialverbindungen immer wieder weitere Supraleiter entdeckt, für die die bisherigen Erklärungsmodelle nicht passen.

Experimente mit Neutronenstreuung am PSI haben kürzlich ergeben, dass eine Cer-Kobalt-Indium-Verbindung in einem starken Magnetfeld eine neue Art der Supraleitung hervorbringt. Zugleich sind in diesem Material die Magnetfelder der Ionen sehr gleichmässig ausgerichtet. Dieses Ergebnis überraschte die Forschenden, denn eigentlich schliessen sich Supraleitung und Magnetismus gegenseitig aus: Normalerweise verhindern starke Magnetfelder den supraleitenden Zustand.

Forschende des PSI sind immer wieder an vorderster Front dabei, wenn es darum geht, die Grenzen des Bekannten zu überwinden. Im Falle der Supraleiter könnte diese Forschung beispielsweise zu neuartigen Computern führen, die weit schneller arbeiten als die derzeitige siliziumbasierte Technologie. Auch die Energieversorgung könnte eines Tages von der Supraleitung profitieren, indem saubere Energie verlustfrei transportiert würde.

<http://psi.ch/WY1e>



# Schnittstellen zur Industrie

Die Forschungsanlagen des PSI werden auch von der Industrie rege genutzt. Die Unternehmen kommen alleine oder in Kooperation mit Universitäten.

## Hochschulen, Unternehmen und das PSI

Wenn die Ingenieure von Schweizer oder ausländischen Firmen bestimmte Materialien untersuchen wollen, reisen sie oft ans PSI. Nicht nur die Experten des PSI stehen ihnen dann zur Seite: Oft arbeiten die Unternehmen auch mit universitären

Arbeitsgruppen als zusätzlichen Partnern zusammen. So entsteht eine bereichernde Kombination von Fachkompetenzen.

Manchmal geht es in der Materialforschung darum, ein neu entwickeltes Material von Grund auf zu verstehen. Und manchmal gibt es Langzeitprojekte, in denen die Herstellungsverfahren für eine spätere Produktentwicklung immer weiter optimiert werden. Die Unternehmen Varta und Toyota nutzen die Neutronen- und Myonenstrahlen am PSI, um die Materialien in kommerziellen NiMH- und Lithium-Ionen-Batterien besser zu verstehen.

Wissenschaftler der Firma Hitachi konnten dank Messungen am PSI die magnetische Körnung von Festplatten vermessen und beobachten, welche physikalischen Vorgänge sich innerhalb jedes Kornes abspielen. Auch Materialien, die Wasserstoff speichern können, sind ein beliebtes Forschungsgebiet. Unter allen Elementen des Periodensystems ist Wasserstoff dasjenige, das von Neutronenstrahlen mit Abstand am besten gesehen wird. Das Forschungsinstitut SINTEF liegt in Norwegen und ist die grösste Einrichtung in Skandinavien, die sich mit Energieumwandlung und -nutzung beschäftigt. Die



SwissNeutronics ist ein Spin-off des PSI. Das Unternehmen verkauft seine optischen Komponenten weltweit. An der SINQ misst die Firma nach wie vor zu Test- und Entwicklungszwecken.



Forschenden von SINTEF nutzen Neutronenstrahlen um zu untersuchen, wie verschiedene Materialien Wasserstoff aufnehmen. Sie wollen Stoffe finden, in denen sich Wasserstoff in grösseren Mengen speichern lässt. Auch Entwickler des Nestlé-Forschungszentrums in Lausanne nutzen regelmässig die Neutronenstrahlen des PSI, um Neuheiten zu testen, mit denen sie Herstellungsprozesse optimieren könnten.

## Problemlösungen für die Industrie

**Die Industrie profitiert oftmals unmittelbar von den Untersuchungen ihrer Produkte mit Neutronen- und Myonenstrahlen.**

Das Unternehmen Schaeffler/LuK nutzte die Bildgebung mit Neutronenstrahlen,

um die Ölverteilung in Motorradkupplungen in Echtzeit zu untersuchen. Dank der Neutronen-Bildgebung konnte das Kupplungsdesign überarbeitet und der Treibstoffverbrauch gesenkt werden.

Der Konzern Alstom untersucht regelmässig Gasturbinenschaufeln mit Neutronenstreuung. Die Ingenieure vergleichen auf diese Art Schaufeln, die aus verschiedenen Legierungen gebaut oder nach dem Herstellungsprozess unterschiedlich behandelt wurden.

Auch das Unternehmen Stihl nutzt Neutronenstrahlen. Damit lässt sich die Verteilung von Treib- und Schmierstoff im Innern eines Motors abbilden, während dieser mit 3000 Umdrehungen pro Minute läuft. Ziel ist es, bei einer Zweitaktmotor-Kettensäge die Abgase zu senken und so den EU-Anforderungen zu genügen.

<http://psi.ch/DLPR>



## Spin-off-Unternehmen

**Das Unternehmen SwissNeutronics ging 1999 als Spin-off aus dem PSI hervor. Seither werden hier optische Komponenten für Neutronenanlagen entwickelt und kommerziell vertrieben.**

Die Leistung einer Neutronenanlage lässt sich über die Anzahl der Neutronen, die pro Sekunde ihr Ziel erreichen, definieren. Diese Zahl kann durch Spezialelemente deutlich gesteigert werden. Sie lenken Neutronen über weite Strecken von der Quelle bis zu den jeweiligen Instrumenten. Forschende und Ingenieure des PSI, die am Aufbau der Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ beteiligt waren, erwarben hierbei ein hervorragendes Verständnis für qualitativ hochwertige Neutronen-Superspiegel. Einige von ihnen gründeten später das Unternehmen SwissNeutronics.

Inzwischen beliefert SwissNeutronics weltweit Kunden mit Komponenten für die Neutronenoptik. Das Unternehmen zählt in diesem Bereich zu den weltweit führenden Herstellern.

## Neue Technologien

**Wenn an einem Institut, das Grossforschungsanlagen betreibt, eine neue Anlage entwickelt wird, ist eine umsichtige Planung nötig. Denn um Spitzenforschung betreiben zu können, müssen die wissenschaftlichen Anforderungen an die Anlage präzise umgesetzt werden.**

An der Schweizer Myonenquelle SpS arbeiten Wissenschaftler und Ingenieure seit vielen Jahren eng mit Herstellerfirmen zusammen. Unter anderem waren die Unternehmen Dubna Detectors, Photonique SA, Hamamatsu Photonics und Zecotec an der Entwicklung moderner, kompakter und effizienter Myonendetektoren beteiligt. Die neuen Detektoren funktionieren auch bei hohen Magnetfeldern und können dicht beieinander installiert werden. An etlichen Stellen der Myonenanlage sind diese Detektoren inzwischen eingebaut, sodass eine grössere Bandbreite von Experimenten möglich ist. Nun wird diese neue Technologie weltweit Wissenschaftlern im Bereich der Myonenforschung zur Verfügung gestellt.

## Eine neue Neutronenquelle für Europa

**Derzeit bringen Schweizer Forschende ihr Knowhow beim Aufbau einer neuen europäischen Neutronen-Forschungsanlage ein. Damit soll auch künftig der Bedarf an Forschungsmöglichkeiten gedeckt bleiben.**

Die Europäische Spallationsquelle ESS ist eine neue Neutronenquelle, die derzeit im schwedischen Lund gebaut wird. Im Jahr 2019 soll sie ihren Betrieb aufnehmen. Diesen immensen Aufwand stemmen 17 europäische Länder gemeinsam, darunter die Schweiz. Da die Technologie der ESS derjenigen an der Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ stark ähnelt, können die Mitarbeitenden des PSI mit ihrer Erfahrung enorm helfen. Sie entwickeln und testen Komponenten und entwerfen zusammen mit Partnerorganisationen in Dänemark Forschungsinstrumente für die ESS.

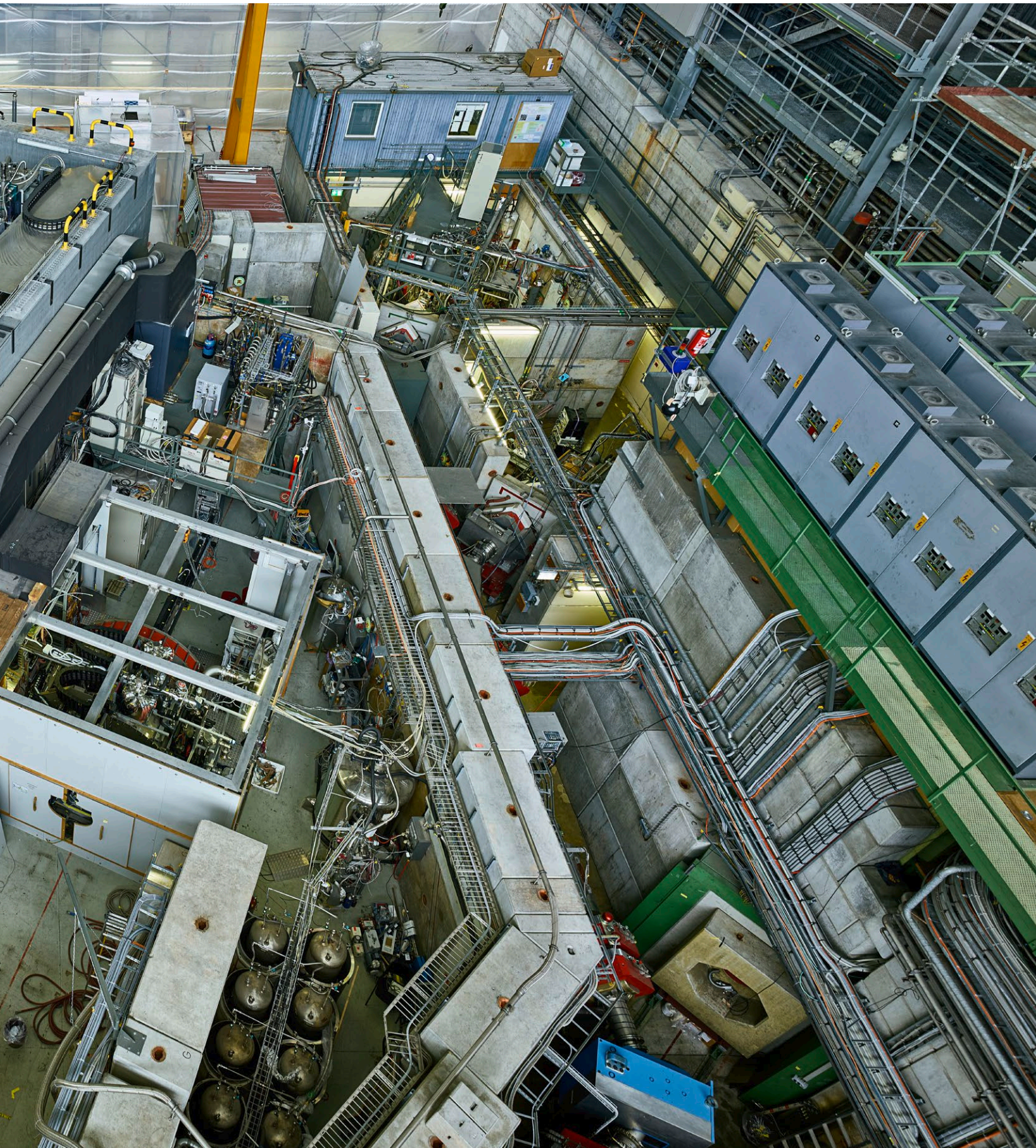






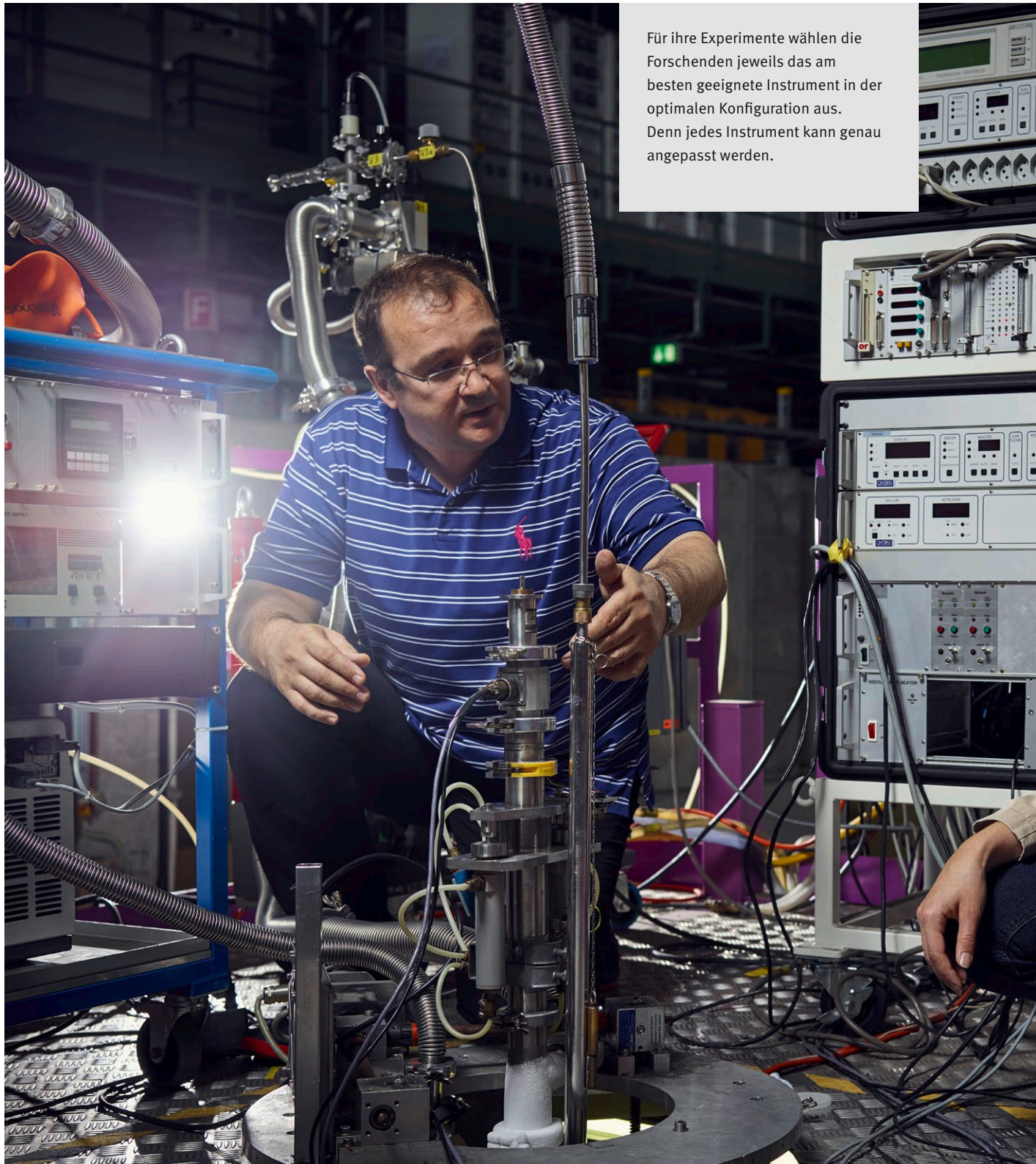


# Die Experimentierhalle mit der Myonenquelle $S_{\mu}S$





# Anwendungen für Neutronen und Myonen



Für ihre Experimente wählen die Forschenden jeweils das am besten geeignete Instrument in der optimalen Konfiguration aus. Denn jedes Instrument kann genau angepasst werden.



Wir selbst und alles um uns herum besteht aus Atomen, den winzigen Bausteinen der Materie. Eine Million von ihnen sind aneinandergereiht so breit wie ein Staubpartikel. Wo genau sich Atome aufhalten und wie sie sich verhalten, das verfolgen Forschende am PSI mithilfe von Neutronen- und Myonenstrahlen.



## Was ist ein Neutron?

**Neutronen sind überall: Zusammen mit Protonen bilden sie die Atomkerne. Nimmt man Elektronen hinzu, hat man die Gesamtzutaten eines jeden Atoms. Doch Neutronen lassen sich aus Atomen herauslösen. In Form von Neutronenstrahlen sind sie höchst nützliche Sonden für Materialwissenschaftler.**

An der Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ werden Neutronen erzeugt. Neutronen im Bündel nennt man Neutronenstrahlen. Forschende an der SINQ durchleuchten ihre Proben mit diesen Strahlen. So können sie den mikroskopischen Aufbau des Probenmaterials untersuchen.

Neutronen haben einige Eigenschaften, die sie zu idealen Sonden in der Materialwissenschaft machen: Erstens haben sie genau die richtige Grösse. So lässt sich mit Neutronen der Abstand zwischen Atomen, die Atombewegung sowie die Wechselwirkungskraft zwischen Atomen vermessen.

Zudem sind Neutronen nicht elektrisch geladen, sondern – wie ihr Name verrät – neutral. Dadurch werden sie kaum von Materie aufgehalten und dringen tief ins Probenmaterial ein. Während sich mit einem Lichtmikroskop nur die Oberfläche betrachten lässt, offenbaren Neutronen das Probeninnere. Neutronen sind somit bestens geeignet, wertvolle oder seltene Materialien zu untersuchen.

Drittens haben Neutronen einen sogenannten Spin. Man kann sich diese Eigenschaft wie eine winzige magnetische Kompassnadel vorstellen. Dank des Spins lassen sich mit Neutronen auch die magnetischen Eigenschaften einer Materialprobe auf mikroskopischer Grössenordnung untersuchen. Tatsächlich rührt das meiste dessen, was wir heute über den Magnetismus auf mikroskopischer Ebene wissen, von Neutronenexperimenten her. Trifft ein Neutronenstrahl auf eine Probe, dringen die Neutronen hinein und werden durch den Aufprall auf die Atome in der Probe in unterschiedliche Richtungen zerstreut. Die gestreuten Neutronen werden von Detektoren oder Kameras eingefangen, die rund um die Probe angebracht sind. Je nachdem, unter welchem Winkel gestreute Neutronen registriert werden,

lässt sich auf die Anordnung und Bewegung der Probenatome schliessen.

Alternativ lassen sich mit Neutronen Radiografiebilder erstellen. In dieser Technik der Bildgebung mit Neutronen ist das PSI weltweit führend.

<http://psi.ch/ztqv>



## Was ist ein Myon?

**Myonen sind nicht Teil der Materie, die uns umgibt. Dennoch prasseln jede Sekunde Hunderte dieser Elementarteilchen auf jeden Einzelnen von uns herab. Sie entstehen in unserer Atmosphäre, wenn kosmische Strahlung auf Luftmoleküle trifft. Auch mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern lassen sich Myonen erzeugen und für die Untersuchung von Materialien nutzen.**

An der Schweizer Myonenquelle SpS werden Myonen erzeugt. Gebündelt und beschleunigt ergeben sie Myonenstrahlen. Materialwissenschaftler nutzen diese, um die mikroskopischen Eigenschaften von Proben zu untersuchen.

Myonen sind elektrisch geladene Elementarteilchen. Zudem haben Myonen – genau wie Neutronen – einen Spin, also die Eigenschaft einer elementaren Magnetnadel. Trifft ein Myonenstrahl auf eine Probe, dringen die einzelnen Myonen unterschiedlich tief in das Probenmaterial ein und werden am Endpunkt ihres Fluges ins Material eingebaut. Wegen ihrer elektrischen Ladung enden Myonen immer in den Lücken zwischen den Atomen der Probe.

Myonen reagieren sehr empfindlich auf ihre unmittelbare Umgebung und zeigen dies durch ihre Drehgeschwindigkeit an. Auf diese Art erfassen Myonen selbst schwache magnetische Felder sowie die Bewegung der nahe gelegenen Atome. Forschende messen die Drehgeschwindigkeit der im Probenmaterial eingebauten Myonen. So können sie auf kleinster Grössenordnung auf lokale Magnetfelder und chemische Eigenschaften schliessen.

<http://psi.ch/VftD>



# Neutronen und Myonen erzeugen

Um Teilchenstrahlen zu erzeugen, sind riesige Apparaturen nötig. Die Anlagen der Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ und der Schweizer Myonenquelle  $S\mu S$  verteilen sich auf drei grosse Gebäude auf dem Westgelände des PSI.

Wer die riesigen Werkhallen der Neutronen- und Myonenquellen betritt, sieht zunächst nur ein heilloses Chaos: Die Gänge gleichen einem Labyrinth, Kabelbündel winden sich von einem unbekanntem Ort zum anderen, Kräne blicken auf die Besucher herab. Und hinter jeder Ecke begegnet man einem neuen, seltsamen und fremdartigen Gerät. Wer sich aber eine Weile hier aufhält, durchschaut mit der Zeit die Logik und Ordnung, die an diesen ungewöhnlichen Orten herrscht.

## Beschleunigte Protonen

**Am PSI entstehen Neutronen und Myonen, wenn ein kontinuierlicher Protonenstrahl mit 80 Prozent der Lichtgeschwindigkeit auf Zielobjekte aus Blei oder Kohlenstoff prallt.**

Protonen entstehen am PSI, wenn die Wasserstoffmoleküle aufgebrochen werden. Mehrere hintereinanderliegende Beschleuniger formen die Protonen dann zum leistungsstärksten Protonenstrahl der Welt. Dieser wird schliesslich auf Zielmaterialien geschossen, um Neutronen oder Myonen zu gewinnen.

An über 220 Tagen im Jahr sind der Protonenbeschleuniger, die Neutronen- und die Myonenquelle ohne Unterbrechung Tag und Nacht im Betrieb.

<http://psi.ch/S8Ve>



## Neutronen freisetzen

**Neutronen werden frei, wenn der Protonenstrahl auf ein Zielstück aus Blei geschossen wird. Ein einzelnes Proton kann dabei zehn Neutronen aus dem Blei lösen.**

Der Protonenstrahl am PSI schießt aus dem Boden nach oben auf ein Stück Blei, das sich in der Mitte einer riesigen Struktur im Zentrum der Neutronenhalle befindet. Das zylindrisch geformte Stück Blei ist 50 Zentimeter lang und 15 Zentimeter breit. Es wird mit Wasser gekühlt, da es sonst durch den kontinuierlichen Protonenbeschuss bis zur Schmelze erhitzt würde.

Die Neutronen werden durch Vakuumröhren geführt. Deren Innenseite ist mit Spezialspiegeln ausgekleidet, wodurch die Neutronen in die richtige Richtung geleitet werden können. So gelangen sie zu den Messinstrumenten in der Neutronenhalle und der Neutronenleiterhalle.

An insgesamt 18 Instrumenten nutzen Forschende die Neutronen aus der Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ.

<http://psi.ch/ZTvQ>



## Myonen erzeugen

**Myonen entstehen, wenn der Protonenstrahl durch zwei Zielstücke aus Kohlenstoff dringt.**

In der Experimentierhalle entstehen die Myonen im Kohlenstoff-Zielelement. Sie werden mit elektrischen und magnetischen Feldern zu den sechs Instrumenten geleitet, an denen mit ihnen geforscht wird.

<http://psi.ch/CGgA>





Das Herz der SINQ. Im Inneren des grossen blauen Blocks werden die Neutronen erzeugt und dann an die Experimentierplätze darum herum weitergeleitet.





# Wir machen's möglich

**Elektronik-Ingenieur**  
Baut elektronische Bauteile, um  
Detektorsignale zu verarbeiten

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

**Kranführer**  
Fährt jeden Tag mehrere Tonnen Ausrüstung  
geschickt von A nach B

**Strahlenschutztechniker**  
Trägt Sorge, dass die Arbeitsumgebung  
für alle sicher ist

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

**Elektriker**  
Installiert Kleinspannungskabel für die Steue-  
rungstechnik sowie Signal- und Datenleitungen

**Softwareentwickler**  
Schreibt Computercodes, die aus den experi-  
mentellen Daten das Maximum herausholen

**Polymechaniker**  
Baut exakt passende Komponenten für  
einzigartige wissenschaftliche Instrumente

**Reinigungsfachkraft**  
Reinigt vorsichtig rund um die empfind-  
lichen und teuren Instrumente



### Techniker

Wartet Instrumente und kühlt manche Proben auf Temperaturen, die kälter als das Weltall sind

### Vakuum-Ingenieur

Ermöglicht luftleere Rohre für kollisionsfreies Teilchenreisen

### Beschleuniger-Physiker

Liefert einen hoch präzisen Teilchenstrahl für die Experimente

### Computernetzwerker

Lässt die Messinstrumente mit den Computern kommunizieren

### Konstruktions-Ingenieur

Lässt Ideen zu funktionierenden wissenschaftlichen Instrumenten werden

### Elektronik-Ingenieur

Macht Kameras und Detektoren ultraschnell, um experimentelle Ergebnisse festzuhalten

### Forscherin

Entwirft Experimente, um neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen





Das Paul Scherrer Institut aus der  
Vogelperspektive.





# Das PSI in Kürze

Das Paul Scherrer Institut PSI ist ein Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften. Am PSI betreiben wir Spitzenforschung in den Bereichen Materie und Material, Energie und Umwelt sowie Mensch und Gesundheit. Durch Grundlagen- und angewandte Forschung arbeiten wir an nachhaltigen Lösungen für zentrale Fragen aus Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft. Das PSI entwickelt, baut und betreibt komplexe Grossforschungsanlagen. Jährlich kommen mehr als 2500 Gastwissenschaftler aus der Schweiz, aber auch aus der ganzen Welt zu uns. Genauso wie die Forscherinnen und Forscher des PSI führen sie an unseren einzigartigen Anlagen Experimente durch, die so woanders nicht möglich sind. Die Ausbildung von jungen Menschen ist ein zentrales Anliegen des PSI. Deshalb sind etwa ein Viertel unserer Mitarbeitenden Postdoktorierende, Doktorierende oder Lernende. Insgesamt beschäftigt das PSI 2100 Mitarbeitende. Damit sind wir das grösste Forschungsinstitut der Schweiz.

## Impressum

### Konzeption/Texte

Dr. Martyn J. Bull

### Redaktion

Dagmar Baroke, Dr. Martyn J. Bull,  
Dr. Paul Pivnicki

### Fotos und Illustrationen

Alle Fotos Scanderbeg Sauer  
Photography, ausser:  
Seite 1/30: Markus Fischer  
Seite 6: Frank Reiser  
Seite 15: Daniel Berger  
Seite 18: Grafik H. M. Rønnow

### Gestaltung und Layout

Monika Blétry

### 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, November 2018

## Kontakte

### Forschungsbereichsleiter

#### Forschung mit Neutronen und Myonen

Dr. Alex Amato a.i.  
Tel. +41 56 310 32 32  
alex.amato@psi.ch

#### Leiter Labor für

#### Neutronenstreuung und Imaging

Prof. Dr. Michel Kenzelmann  
Tel. +41 56 310 53 81  
michel.kenzelmann@psi.ch

#### Leiter Labor für Myonspin-Spektroskopie

Dr. Thomas Prokscha a.i.  
Tel. +41 56 310 42 75  
thomas.prokscha@psi.ch

#### Leiter Labor für Neutronen und Myonen

#### Instrumentierung

Prof. Dr. Marc Janoschek  
Tel. +41 56 310 49 87  
marc.janoschek@psi.ch

#### Leiter PSI Nutzerbüro

Dr. Stefan Janssen  
Tel. +41 56 310 28 75  
stefan.janssen@psi.ch

#### Leiterin Abteilung Kommunikation

Dr. Mirjam van Daalen  
Tel. +41 56 310 56 74  
mirjam.vandaalen@psi.ch



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

SINQ/SpS\_d, 10/2021

