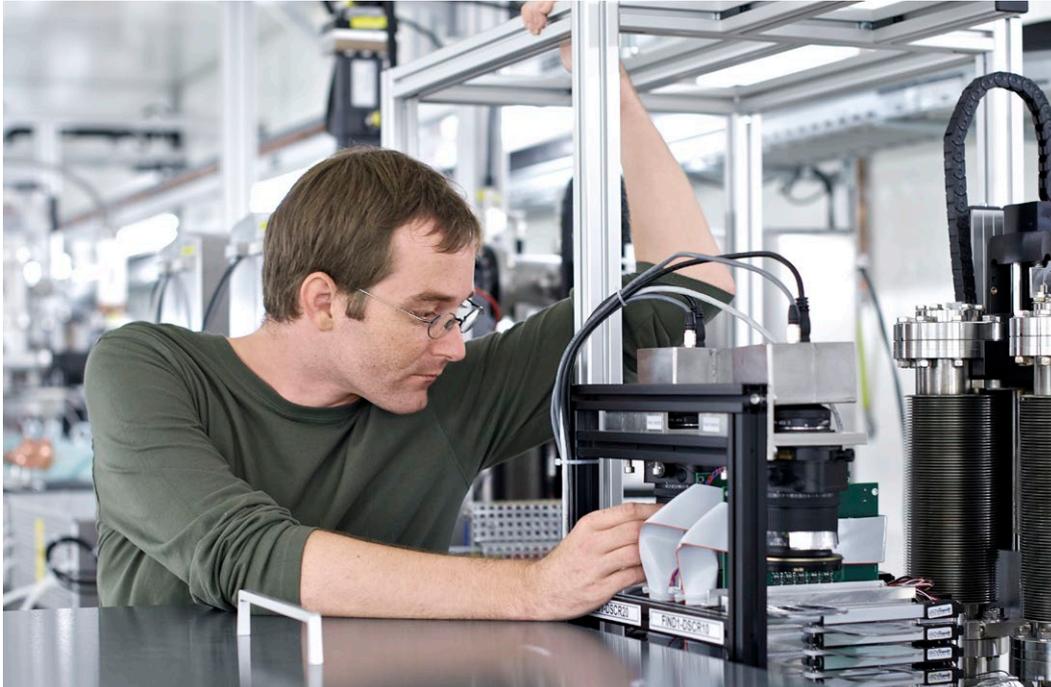


PAUL SCHERRER INSTITUT



Materialien für die Zukunft

Forschung am Paul Scherrer Institut

Materialproben werden am PSI beispielsweise mit Röntgenstrahlen untersucht, wie hier im Falle leitfähiger Polymere, die Ausgangsmaterial sind z.B. für künftige Transistoren, Solarzellen oder Leuchtdioden.



Inhalt

- 5 **Materialien bestimmen den Fortschritt**
 - 6 Röntgenstrahlen als Mikroskop
 - 6 Katalysatoren beschleunigen
 - 7 Langer Zeithorizont
 - 7 Reaktionen beobachten
- 8 **Lithiumionen-Batterien**
 - 8 Lebensdauer ist beschränkt
 - 9 Einzigartige Kombination
- 10 **Brennstoffzellen für das Auto**
 - 10 Kunststoffmembran trennt
 - 11 Neutronen-Imaging
- 12 **Katalysatoren für Energie und Umwelt**
 - 12 Vom Kraftwerk zum Auto
 - 13 Die Zukunft gehört der Bioenergie
- 14 **Stahl im Alter**
 - 15 Stahl in Kernkraftwerken
 - 15 Kühlwasser muss rein sein
- 16 **Informationen speichern**
 - 17 Magnetische Materialien
 - 17 Feinste Strukturen
- 18 **Spintronik für schnelle Computer**
 - 18 Spin trägt Information
 - 19 Nur am PSI langsam genug
- 20 **Die Kabel der Zukunft**
 - 20 Supraleiter im Einsatz
 - 21 Dem Phänomen auf der Spur
- 22 **Magnete unter Spannung**
 - 22 Eigenschaften kombinieren
 - 23 Die Forschung steht am Anfang
- 24 **Auf die Details im Innern kommt es an**
 - 25 Perfekte Kristalle züchten
 - 25 Dünne Schichten schaffen Abhilfe
- 26 **Die Werkzeuge der Wissenschaft**
 - 26 Synchrotronlicht
 - 27 Neutronen
 - 28 Myonen
 - 29 SwissFEL
- 31 **Das PSI in Kürze**
 - 31 Impressum
 - 31 Kontakte

Umschlagbild

An der neuen Grossforschungsanlage SwissFEL kann das PSI Materialforschung mit völlig neuartigen Experimenten betreiben.



Wie sich magnetische Domänen in einem Material anordnen, spielt bei der magnetischen Datenspeicherung eine grosse Rolle. Am PSI nutzen die Forschenden die Fotoemissions-Elektronenmikroskopie, um die Domänen, kleine Bereiche eines Materials, abzubilden.

Materialien bestimmen den Fortschritt

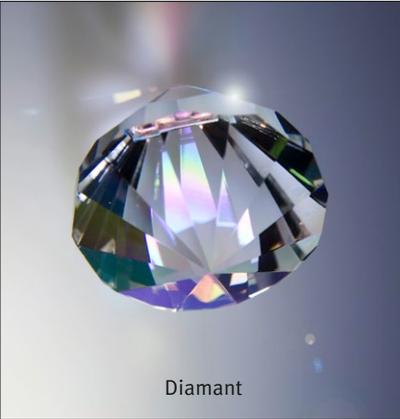
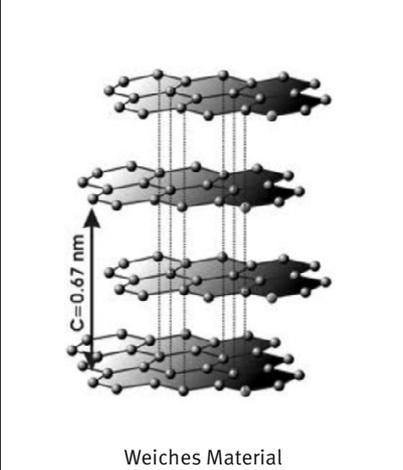
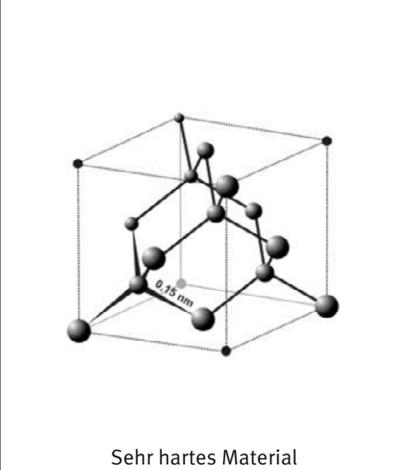
Die Urgeschichte wird eingeteilt in die Stein-, Bronze- und Eisenzeit. Mit jedem neuen Material machte die Menschheit einen Entwicklungsschritt. Wer heute einen Computerchip oder eine Batterie für ein Elektroauto entwickeln will, muss die Materialien genau verstehen. Forschende am PSI untersuchen die Strukturen bis ins kleinste Detail, bis hin zu den einzelnen Atomen. So resultiert aus der heutigen Grundlagenforschung die Technologie von morgen.

Diamant ist das härteste Material, das auf der Erde natürlich vorkommt. Grafit hingegen ist so weich, dass es als Bleistiftmine verwendet wird. Wenn wir schreiben, wird der Grafit vom Papier abgerieben. Das Erstaunliche ist nun, dass sowohl Diamant als auch Grafit aus Kohlenstoff bestehen, aus ein und

derselben Substanz. Im 18. Jahrhundert glaubte dies noch niemand. Bis 1796 der englische Chemiker Smithson Tennant einen Diamanten verbrannte und dabei feststellte, dass nur Kohlendioxid (CO_2) entsteht – dasselbe Gas, das auch beim Verbrennen von Grafit entweicht.

Der Unterschied besteht im Wechselspiel der Kräfte zwischen den Atomen im Material. Verantwortlich für dieses Wechselspiel sind die Elektronen, die so die Eigenschaften des Materials festlegen. Und dies spiegelt sich in der Struktur wider: Im Diamant binden sich die Kohlenstoffatome starr in alle Richtungen. Im Grafit hingegen sind es lose Schichten, ähnlich wie in Schiefergestein. Die Schichten haften kaum aneinander. Entsprechend leicht ist es, Grafit zu zerreiben.

Tennant wusste dies noch nicht, denn unter einem normalen Lichtmikroskop sieht man die Atome nicht. Erst als die Röntgenstrahlen entdeckt wurden, begannen die Wissenschaftler, die Materialien genauer zu analysieren. Wenn Röntgenstrahlen auf eine Probe treffen, werden sie in ganz bestimmte Richtungen abgelenkt. Aus dem resultierenden Muster kann die Anordnung der Atome, also die Struktur des Materials, bestimmt werden.

Reiner Kohlenstoff C	
 <p>Grafit</p>	 <p>Diamant</p>
 <p>Weiches Material</p>	 <p>Sehr hartes Material</p>

Trotz ihrer ganz unterschiedlichen Eigenschaften bestehen Grafit (Bleistiftmine) und Diamant beide aus Kohlenstoff. Der Unterschied liegt lediglich in der Art, wie die Atome untereinander verbunden sind, also in der Struktur des Materials. 1 nm (Nanometer) entspricht einem millionstel Millimeter.



Wissenschaftlerinnen des PSI an einer Anlage, an der mithilfe eines Lasers dünne Schichten von unterschiedlichen Materialien hergestellt werden können.

Röntgenstrahlen als Mikroskop

Am PSI werden Materialien noch heute mit Röntgenstrahlen untersucht. Der Apparat ist allerdings grösser als derjenige bei einem Zahnarzt: Das Röntgengerät des PSI, der Speicherring der Synchrotronlichtquelle Schweiz SLS, hat einen Umfang von knapp 300 Metern und ist entsprechend leistungsfähig. Röntgenlicht eignet sich aber nicht für alle Materialien. Beispielsweise werden Proben in einer anderen Grossforschungsanlage mit Neutronen beschossen, um die Strukturen zu untersuchen. Während Röntgenstrahlen von Metall stark gedämpft werden, sind einige Metalle für Neutronen fast transparent. Wasser hingegen bremst Neutronen. Das exotischste Teilchen, das die Forscher am PSI zur Materialforschung verwenden, ist das Myon. Sie untersuchen damit magnetische Mate-

rialien. Das PSI ist eines von nur zwei Forschungsinstituten weltweit, die alle drei Methoden – Röntgenlicht, Neutronen und Myonen – an einem Ort bereitstellen.

Die Wissenschaftler kommen aus der ganzen Welt, um in der Schweiz am PSI ihre Materialproben zu untersuchen. Besonders aktuell sind Forschungsprojekte aus dem Energiebereich: Beispielsweise sollen Lithiumionen-Batterien für künftige Elektroautos verbessert werden. Die Materialien für neue Batterien werden am PSI getestet und analysiert, mit dem Ziel, die Reichweite der Elektroautos und die Lebensdauer der Batterien zu erhöhen. Das heisst aber nicht, dass das PSI marktreife Batterien herstellen oder verkaufen würde. Im Labor werden oft nur kleinste Proben untersucht und neue Materialien entwickelt. Die Fabrikation der kompletten Batterie bleibt der Industrie vorbehalten.

Katalysatoren beschleunigen

Ein anderes Beispiel aus dem Automobilbereich ist der Katalysator. Im Motor entstehen bei der Verbrennung Kohlenmonoxid sowie Stickoxid und Schwefeldioxid; letztere führen zu saurem Regen. Der Autokatalysator wandelt diese Stoffe in ungiftige Gase um, bevor sie durch den Auspuff in die Umwelt gelangen. Dank dem Autokatalysator und einer katalytischen Vorbehandlung der Treibstoffe gibt es in der Schweiz und in weiten Teilen Europas keinen sauren Regen mehr. Trotzdem wird er am PSI weiter optimiert. Denn es stecken Edelmetalle wie Platin oder Seltene Erden darin. Je weniger davon verwendet wird, desto günstiger werden die Produkte. Allenfalls liesse sich sogar ein neues Material für Katalysatoren finden.

Katalysatoren stecken nicht nur in Autos. Es sind grundsätzlich Stoffe, die

eine chemische Reaktion beschleunigen, aber selber nicht verbraucht werden. Sie werden in vielen chemischen Prozessen eingesetzt. Ja sogar in einem weitverbreiteten Herstellungsverfahren zur Produktion von Diamanten! Denn die Industrie hat einen hohen Bedarf an Diamanten, um damit zu schneiden, bohren oder schleifen. Unter hohem Druck und hoher Temperatur wandelt sich Grafit in künstliche Diamanten um. Verwendet man einen Katalysator, reichen geringere Drücke und Temperaturen. So verbraucht die Herstellung weniger Energie und wird preiswerter.

Langer Zeithorizont

Die erwähnten Beispiele aus der Materialforschung dienen dazu, ein bestehendes Produkt oder einen Herstellungsprozess zu verbessern. Die Technologien sind nahe am marktreifen Produkt, auch wenn es oft Jahre dauert, bis man als Kunde profitiert. In anderen Forschungsprojekten arbeiten die Wissenschaftler nicht direkt an konkreten Produkten, sondern haben erst Ideen, wie das neue Material eines Tages genutzt werden könnte. Hier werden die Grundlagen erforscht. Ein Beispiel dafür ist Graphen. Es besteht, wie Diamant und Grafit, aus Kohlenstoff, hat aber wieder eine andere Struktur und besteht aus einer einzelnen Lage von Kohlenstoffatomen. Diese Lage ist sehr reissfest, hundertmal zäher als Stahl. Und die Elektronen bewegen sich darauf so schnell, dass ein Computer mit einem Graphen-Chip zehn- bis hundertmal schneller als heutige Prozessoren wäre.

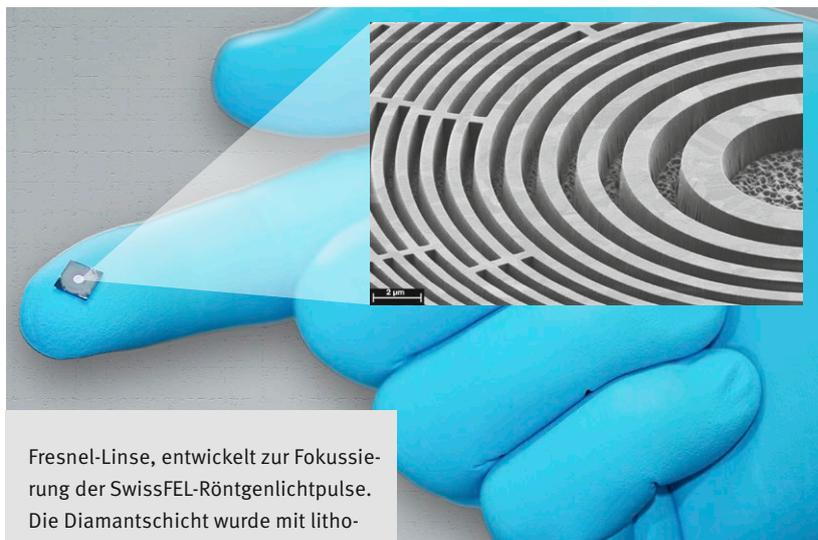
Ob ein Graphen-Computer sich jemals realisieren lässt, ist ungewiss. Im Moment arbeiten die Wissenschaftler an einzelnen Transistoren. Ein Computerchip besteht aber aus Milliarden davon. Von der ersten Idee bis zu einem Produkt dauert es in der Materialforschung oft Jahrzehnte. Zum Vergleich: Die Transistoren, die heute in den Computern stecken, wurden in den 1950er-Jahren entwickelt.

Reaktionen beobachten

Etwas können die Forschenden am PSI noch nicht: Sie können nicht verfolgen, wie sich eine molekulare Struktur oder die Position der Atome in einem Material in Echtzeit verändern. So träumen sie etwa von der künstlichen Photosynthese. Die Pflanzen machen uns vor, wie es möglich wäre, Energie aus Sonnenlicht zu nutzen. Die chemischen

Reaktionen laufen aber zu schnell ab, als dass man sie beobachten könnte. Zudem gibt es biologische Proben, die schlicht zu klein sind, um in den bestehenden Anlagen analysiert zu werden. Beide Probleme soll eine neue Grossanlage lösen: der SwissFEL. Dieses Gerät wird mit kurzen Röntgenpulsen arbeiten, die stark auf einen Punkt fokussiert sind. Damit könnten Wissenschaftler sogar sichtbar machen, wie komplexe Moleküle in einer menschlichen Zelle funktionieren. Die Mediziner hoffen, mit dem Wissen neue Medikamente entwickeln zu können.

Beim Bau des SwissFEL schliesst sich der Kreis der Materialforschung: Die Linse, die die Röntgenstrahlen fokussiert, muss extrem widerstandsfähig sein. Ein gutes Material dafür wäre Diamant.



Fresnel-Linse, entwickelt zur Fokussierung der SwissFEL-Röntgenlichtpulse. Die Diamantschicht wurde mit lithografischen Verfahren strukturiert, um das Fokussieren zu ermöglichen. 1 µm (Mikrometer) entspricht einem tausendstel Millimeter.

Lithiumionen-Batterien



Mit einem Elektronenmikroskop untersuchen die Forschenden am PSI das Altern der Lithiumionen-Batterien nach vielen Lade- und Entladezyklen.

Die Elektroautos der Zukunft fahren mit Lithiumionen-Batterien. Forscher am PSI verbessern die Materialien und helfen Firmen aus der Automobilindustrie, die Prototypen der Batterien zu analysieren und zu testen.

Um 1900 fuhren in New York doppelt so viele Autos, die Strom tankten, als Fahrzeuge mit Benzinmotoren. Die Bleibatterien waren zwar schwer und erlaubten nur Reichweiten von 50 Kilometern pro Tag. Doch damals reichte dies, weil die Strassen ausserhalb der Stadt zu schlecht waren. Erst als die Agglomeration besser erschlossen wurde und die Benzinmotoren in Mas-

senfertigung hergestellt und damit billig wurden, setzten sich die Benzinmotoren durch.

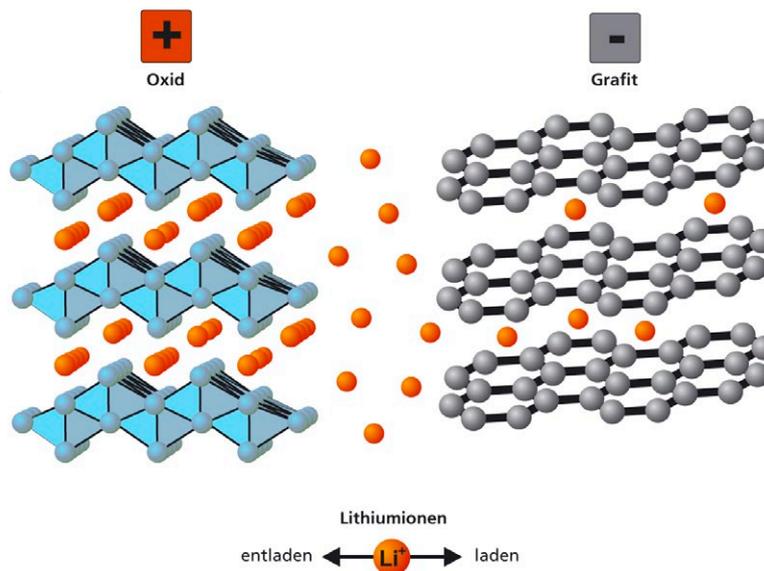
Aufgrund der Klimaerwärmung und der beschränkten Reserven an Erdöl ist heute das Elektroauto wieder im Gespräch. Allerdings nicht mit Bleibatterien. Diese sind für die erwünschte Reichweite nach wie vor zu schwer. In Mobiltelefonen und Laptops haben sich Lithiumionen-Batterien durchgesetzt. Lithium ist ein leichtes Metall, das chemisch das grösste Potenzial zum Speichern von elektrischer Energie hat. In seiner reinen Form reagiert es aber heftig mit Wasser und darf auch nicht mit Sauerstoff in Berührung kom-

men. In den Laptop-Batterien befindet es sich deshalb in Form von Lithiummetalloxid in einer der beiden Elektroden. Die andere Elektrode besteht aus Graphit. Wenn man die Batterie lädt, wandern Lithiumionen durch eine Salzlösung zur Graphit-Schicht, wo sie sich anhäufen. Wird die Batterie entladen, wandern die Ionen wieder zurück.

Lebensdauer ist beschränkt

Beim Laden dehnt sich die Graphit-Schicht jedes Mal um rund 10 Prozent aus. Bis vor einigen Jahren beschränkte dieses ständige Dehnen und Schrump-

Lithiumionen wandern beim Laden der Batterie von der positiven Elektrode in die Schichten der negativen Grafit-Elektrode. Beim Entladen erfolgt der umgekehrte Prozess.



fen die Lebensdauer von Lithiumionen-Batterien auf wenige hundert Lade- und Entladezyklen. Erst als die Forscher diesen Vorgang erkannten und die Grafit-Schicht stabilisierten, war eine Lebensdauer möglich, wie sie für Elektroautos verlangt wird.

Noch heute arbeiten Wissenschaftler des PSI an neuen Materialien für Lithiumionen-Batterien. Unter dem Rasterelektronenmikroskop kontrollieren sie die Alterung des für die Elektrode verwendeten Materials. Ein feiner Strahl von Elektronen tastet die Oberfläche ab. Der Bildschirm zeigt an, wo wie viele Elektronen zurückgeworfen werden. Ein gewöhnliches Mikroskop können die Forscher nicht einsetzen. Die Wellenlänge des normalen Lichts ist zu gross für die feinen Strukturen im Material. Dies wäre, als ob man mit einer grossen Spraydose eine Postkarte schreiben wollte – der Farbstrahl wäre schlicht zu

breit. Die Elektronen, die auf die Proben der Batterien «geschossen» werden, sind viel kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts.

Einzigartige Kombination

Das PSI ist eines der wenigen Labors weltweit, die Lithiumionen-Batterien während des Ladens und Entladens durchleuchten können. Aus der ganzen Welt kommen deshalb Forscherinnen

und Forscher ans PSI. Sie untersuchen, wie die Lithiumionen in die Schichten wandern und dort gespeichert werden. Dies geschieht einerseits mit Röntgenstrahlen an der Synchrotronlichtquelle Schweiz SLS, andererseits mit Neutronen an der Schweizerischen Spallations-Neutronenquelle SINQ. Denn ausgerechnet Lithiumatome sind für Röntgenstrahlen praktisch durchsichtig, weil sie so leicht sind. Für Neutronen ist das Lithium hingegen gut sichtbar. Das PSI arbeitet einerseits an der Verbesserung von heute im Markt vorliegenden Batteriekonzepten. Andererseits arbeiten die Forscher an zukünftigen Technologien, die in 10 oder 20 Jahren auf den Markt kommen werden. Beispielsweise Lithium-Schwefel-Batterien, deren Prinzip im Labor bereits gezeigt werden konnte. Die Technologie mit dem grössten Potenzial wäre die Lithium-Luft-Batterie. Die Forschung ist zwar erst wenig fortgeschritten, aber Ladekapazitäten um einen Faktor 10 höher als bei den heutigen Lithiumionen-Batterien wären theoretisch möglich. Dies entspräche einem Elektrofahrzeug mit einer Reichweite von rund 500 Kilometern.



Wissenschaftlerin bei der Herstellung einer Grafit-Elektrode. Die schwarze Schicht aus Grafit wird flüssig aufgetragen, verteilt und getrocknet. Diese Grafit-Elektrode nimmt in der Batterie beim Ladevorgang die Lithiumionen auf und speichert somit die Energie.

Brennstoffzellen für das Auto

Heutige Elektroautos fahren mit einer Batterieladung 100 bis 150 Kilometer weit. Mit Brennstoffzellen kann die Reichweite vergrößert werden. Forscher am PSI entwickeln alltagstaugliche Materialien und Konzepte.

Um das Jahr 2000 wurde die Brennstoffzelle als Antrieb für das Auto von morgen gefeiert. Die Experten gingen davon aus, dass spätestens 2005 erste Brennstoffzellen-Autos auf dem Markt erhältlich sein würden. Dem war leider nicht so. Die Systeme funktionierten zwar zuverlässig in den Labors, im Alltag auf der Strasse zeigten sich aber Probleme: Das häufige Starten und Stoppen im Stadtverkehr beanspruchte die Systeme stark. Statt eine Lebensdauer von mindestens 200 000 Kilometern zu erreichen, mussten die Brennstoffzellen frühzeitig ausgetauscht werden. Bei Temperaturen tief unter dem Gefrierpunkt gefror zudem das Wasser, das als Endprodukt in der Zelle entsteht. Wer aber ein Auto kauft, will auch in den Skiferien bei -20°C losfahren können.

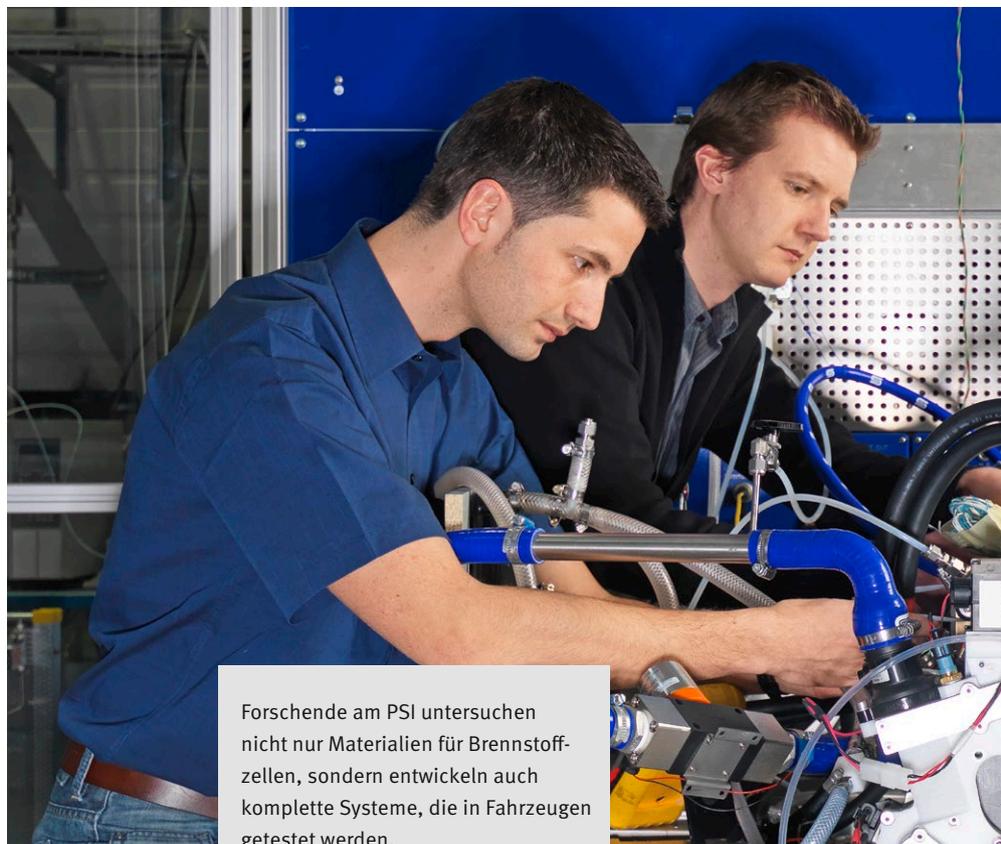
Wasserstoff ist der Treibstoff für die Brennstoffzellen. Er wird nicht wie in einem konventionellen Motor verbrannt, sondern kontrolliert mit Sauerstoff zur Reaktion gebracht. Zuerst wird der Wasserstoff (H_2) in einzelne Atome getrennt. Dabei verliert jedes Atom ein Elektron. Der nackte Kern des Wasserstoffatoms (H^+), ein sogenanntes Proton, durchdringt nun eine Kunststoffmembran. Auf der anderen Seite der Membran kommt es mit dem Sauerstoff (O_2) in Kontakt und bildet dabei Wasser (H_2O). Die Elektronen können den isolierenden Kunststoff nicht durchdrin-

gen. Sie werden über eine Elektrode abgeführt und fließen als elektrischer Strom auf die andere Seite. Dieser Strom treibt den Motor des Fahrzeugs an. Das Prinzip wurde erstmals in den 1960er-Jahren für die Weltraummissionen der NASA technisch genutzt.

Kunststoffmembran trennt

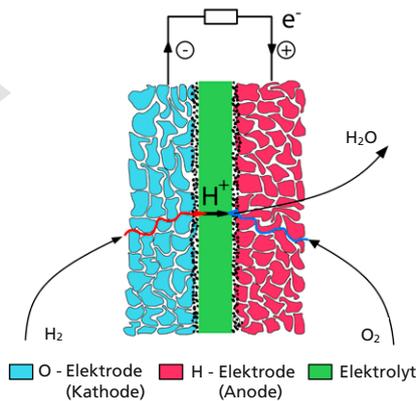
Das Kernstück der Brennstoffzelle ist die Membran aus Kunststoff. Darin enthaltene winzige Kanäle befördern die Protonen, die von Wassermolekülen umgeben sind. Dabei wirkt der Kunst-

stoff wie ein Schwamm: Nur wenn er etwas feucht ist, kann er die Protonen in der Wasserhülle aufnehmen und durchleiten. Eine trockene Membran kann dies nicht. Das wäre, als ob man einen schmutzigen Tisch mit einem trockenen Lappen aufwischen wollte. Die Herausforderung ist also, die Kunststoffmembran in einer Brennstoffzelle mit 20% Feuchtigkeit zu sättigen, egal ob der Fahrer mit Vollgas oder im Leerlauf fährt. Nun besteht aber ein Brennstoffzellensystem aus einem Stapel von Hunderten von Membranen. Die Feuchtigkeit muss gleichmässig verteilt werden.



Forschende am PSI untersuchen nicht nur Materialien für Brennstoffzellen, sondern entwickeln auch komplette Systeme, die in Fahrzeugen getestet werden.

Querschnitt durch eine Polymer-elektrolyt-Brennstoffzelle: Das Wasserstoffgas als Treibstoff und die Feuchtigkeit für den Transport durch die Membran müssen gleichmässig in der Brennstoffzelle verteilt werden.



Neutronen-Imaging

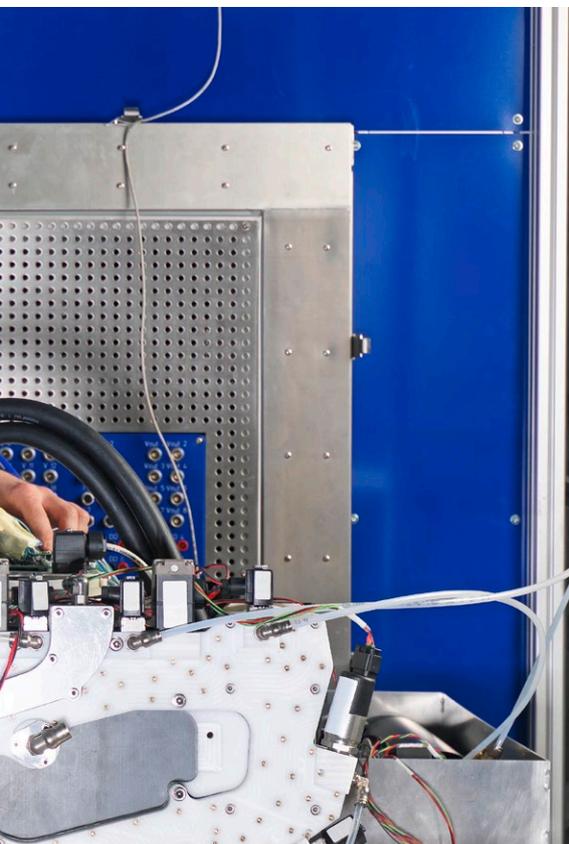
Wie macht man die Feuchtigkeit in einem geschlossenen Metallgehäuse sichtbar? Das PSI hat das Gerät dazu: Die Forscher durchleuchten, ähnlich einem Röntgenbild, die ganze Brennstoffzelle. Sie verwenden hierzu aber keine Röntgenstrahlen, sondern Neutronen. Treffen diese auf Wasser, werden sie abgebremst und absorbiert, das Metall hingegen passieren die Neutronen fast ohne Verlust – ganz im Gegensatz zu Röntgenstrahlen. Aus dem resultierenden Bild können die Entwickler nachvollziehen, wo die

Feuchtigkeit in den Zellen verteilt ist. Einige der weltweit tätigen Autokonzerne kommen deshalb ans PSI. Eine andere Frage, die die Forscher beschäftigt, ist die Porosität der Brennstoffzellen-Membran. Dazu analysieren sie auch die atomare Struktur der Membran an der Synchrotronlichtquelle Schweiz SLS.

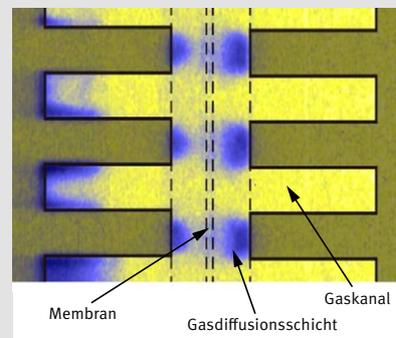
Um die Brennstoffzelle für die Praxis fit zu trimmen, reicht es nicht, nur die

sie für kurze Zeit die Bremsenergie und beschleunigen später das Fahrzeug. Forscher des PSI-Labors für Elektrochemie, die an den Brennstoffzellen arbeiten, entwickeln ebenso die Technologie und Materialien für Superkondensatoren.

Dass heute noch keine Brennstoffzellen-Autos breit auf dem Markt eingeführt wurden, liegt nicht mehr hauptsächlich an den technischen Herausforderungen. Vielmehr ist der Preis zu hoch. Statt die Kunststoffmembran mit teuren, speziellen Verfahren herzustellen, arbeitet das PSI deshalb an einer Membran mit herkömmlichen Plastikfolien,



Das Innere einer Brennstoffzelle: Das Bild zeigt die Feuchtigkeitsverteilung. Es wurde mit Neutronen aufgenommen, die vom Wasser (blau dargestellt) stark abgebremst und absorbiert werden.



Membran zu verbessern. So gefriert bei tiefen Temperaturen nicht etwa das Wasser in der Membran, sondern das Wasser, das beim chemischen Prozess entsteht und die Zellen als Abfallprodukt verlässt. Um dieses Problem zu lösen, muss das ganze System miteinbezogen werden. Ein weiterer Punkt ist das schnelle Bereitstellen der Leistung beim Start-und-Stop-Verkehr, was für die Zellen ein Problem ist. Dieses kann mit Superkondensatoren entschärft werden. Wie eine Batterie speichern

wie sie für Gewächshäuser verwendet werden. Durch ein paar zusätzliche Verarbeitungsschritte wird die Folie zur Brennstoffzellen-Membran. Mittlerweile sind sich die Experten einig, dass bezahlbare und alltagstaugliche Brennstoffzellen-Fahrzeuge in wenigen Jahren erhältlich sein werden.

Katalysatoren für Energie und Umwelt

Strenge Emissionsgrenzwerte sorgen in den letzten Jahren für eine rasante Entwicklung von Abgaskatalysatoren. Doch Katalysatoren sorgen nicht nur für saubere Luft auf den Strassen, sondern sie verbessern auch viele chemische Prozesse.

Katalysatoren kennt man vom Auto. Bei der Verbrennung von Benzin, Diesel oder anderen Kraftstoffen entstehen auch Kohlenmonoxid und Stickoxide. Diese können mit einem Katalysator in ungiftige Stoffe umgewandelt werden. Weniger bekannt ist, dass Katalysatoren auch verbreitet in der Chemie eingesetzt werden. Als Katalysator bezeichnet man einen Stoff, der die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion erhöht, ohne dabei selbst verbraucht zu werden. Man schätzt, dass bei der Herstellung von mehr als 80 % aller chemischen Produkte ein Katalysator verwendet wird. Bei der idealen Katalyse werden die Ausgangsstoffe möglichst vollständig umgewandelt, es sollen keine unerwünschten Nebenprodukte entstehen. Ausserdem wird möglichst wenig Energie verbraucht. Das wäre der Inbegriff nachhaltiger Technologie. Oftmals machen Katalysatoren chemische Prozesse jedoch technisch erst möglich.

Vom Kraftwerk zum Auto

Ein aktives Forschungsgebiet in der Abgasnachbehandlung ist die selektive katalytische Reduktion, das sogenannte SCR-Verfahren, wie es bereits heute in vielen Lastwagen eingesetzt wird. Dabei wird Ammoniak ins heisse



Wissenschaftler am PSI suchen nach Katalysatoren, die beispielsweise die Umwandlung von Biomasse in Methan ermöglichen.

Verbrennungsabgas eingebracht, das mit den Stickoxiden auf dem Katalysator zu Stickstoff reagiert. Zunächst wurden SCR-Katalysatoren in Kraftwerksanlagen eingesetzt, deren Abgase gesäubert werden mussten. Erst Ende der 80er-, Anfang der 90er-Jahre rückten Dieselfahrzeuge in den Fokus der Forschung. Heute liegt hier sogar der Schwerpunkt, denn hier ist das Stickoxid-Problem am dringendsten und die Anforderungen sind am höchsten. Im Fahrzeug wird das Ammoniak nicht direkt eingesetzt, sondern aus Harn-

stoff gewonnen, der – bekannt unter dem Namen AdBlue – als wässrige Lösung getankt wird. In Nutzfahrzeugen ist dieses Verfahren seit 2005 etabliert. Forscher am PSI machen Versuche mit neuen Katalysatormaterialien und anderen Substanzen anstelle des Ammoniaks. Grund für die rege Forschungstätigkeit sind die immer strikteren gesetzlichen Abgasgrenzwerte. Diese können bei grösseren Dieselfahrzeugen nur noch mit dem SCR-Verfahren eingehalten werden.



Die Zukunft gehört der Bioenergie

Am PSI befassen sich Katalyseforscher aber nicht nur mit der Abgasnachbehandlung. Ein Ziel der Wissenschaftler ist es, aus Biomasse, also nachwachsenden Rohstoffen, Energie zu gewinnen, und zwar aus solchen, die nicht mit der Lebensmittelproduktion konkurrieren. Dazu suchen sie nach Katalysatoren, die beispielsweise die effiziente Umwandlung von Biomasse in Methan ermöglichen. Es sollen keine Nebenprodukte entstehen und die Reaktion soll bei möglichst tiefen Temperaturen ablaufen, damit der Energieaufwand gering bleibt.

Um Biomasse zu Methan zu konvertieren, wird sie am PSI unter hohem Druck auf bis zu 380 °C aufgeheizt und dann über einen Katalysator aus Ruthenium geleitet. Unter diesen Bedingungen kann sie zu rund 45 % in Methan umgewandelt werden. Der Rest wird zu den Nebenprodukten Kohlendioxid, Was-

serstoff und Wasser. Ohne Katalysator wäre diese Umwandlung nicht möglich. Eine andere Art der Energiegewinnung ist die Fotosynthese. Die Pflanzen brauchen dafür Wasser, Kohlendioxid (CO₂) und Sonnenlicht. Daraus gewinnen sie Kohlenhydrate, die als Energieträger dienen, und Sauerstoff. Weltweit arbeiten Wissenschaftler daran, die Fotosynthese künstlich nachzuahmen. Dabei werden Katalysatoren aus Nickel und Kobalt eingesetzt, die mithilfe von Sonnenlicht die Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff ermöglichen und die später in einer Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt werden können.

Noch ist uns die Natur in der Fotosynthese um einiges voraus und so sind die Wirkungsgrade der künstlichen Fotosynthese recht bescheiden. Es steht aber außer Frage, dass Bioenergie und künstliche Fotosynthese wichtige Themen sein werden, wenn die Erdölreserven zurückgehen. Auf lange Sicht wird Biomasse eine wichtige Kohlenstoffquelle für die Gewinnung von chemischen Produkten und Kraftstoffen darstellen. Weil auf diesem Gebiet erst seit 15 bis 20 Jahren intensiv geforscht wird, rechnen die Wissenschaftler hier noch mit Überraschungen, was das Potenzial der Methode anbelangt.



Unterschiedliche Katalysatoren beschichtet auf keramischen Wabenkörpern (ganz links unbeschichtet). Je nach chemischer Zusammensetzung des Katalysators variiert die Farbe.

Stahl im Alter

Stahl hält Brücken und Gebäude zusammen. Von der Autokarosserie bis zum Druckgefäß im Kernreaktor wird der Werkstoff breit eingesetzt. Um die Sicherheit zu garantieren, müssen Stahlkonstruktionen allerdings regelmässig geprüft werden, denn auch Stahl altert.

Am 9. Mai 1985 stürzte die Decke im Hallenbad Uster (ZH) ein und begrub die Schwimmer unter sich, die am späten Abend noch im Wasser waren. Es stellte sich heraus, dass ein grosser Teil der

207 Stahlbügel, die die Betondecke hielten, gerissen war. Entgegen ersten Vermutungen war es aber nicht Baupfusch oder schlechter Unterhalt, die zum Einsturz führten. So setzte der Architekt sogar nicht rostenden Chromstahl ein, weil die Bügel der feuchten Luft im Hallenbad ausgesetzt waren. Die chlorhaltige Luft führte aber zu feinsten Haarrissen im Stahl. Über die Jahre

wuchsen diese Risse, bis rund ein Viertel der Bügel komplett durchgerostet war – ohne dass man es von aussen gesehen hätte.

Die Haarrisse lassen sich nicht mit dem Rost vergleichen, den man etwa am Auto findet. Rostet normaler Stahl, verfärbt sich die Oberfläche rot und blättert ab. In Uster führte Spannungsrisskorrosion zum Einsturz: Kleinste Risse, die man nur unter dem Mikroskop sieht, wachsen, wenn der Stahl unter Zugspannung steht und Chlor das rostfreie Metall angreift.

Forschende am PSI untersuchen das Verhalten von Stahl unter verschiedenen Umgebungsbedingungen.



Mit dieser Anlage wird Stahl bei Verhältnissen geprüft, wie sie im Kernkraftwerk vorkommen. Die Resultate fließen in mathematische Modelle ein, mit denen die Sicherheit und damit die Lebensdauer der Kernanlagen eingeschätzt werden kann.



Stahl in Kernkraftwerken

Diese unsichtbaren Risse beschäftigen auch Wissenschaftler am PSI, die sich mit der Sicherheit von Kernanlagen beschäftigen: Der Stahl in einem Atomkraftwerk ist dem heissen Kühlwasser und radioaktiver Strahlung ausgesetzt, die ebenso zu Spannungsrisskorrosion, aber auch zu einer Versprödung des Stahls führen können. Wie im Hallenbad Uster lässt sich der Zustand eines Reaktorgefässes nicht von aussen beurteilen. Die Haarrisse sieht man häufig erst unter dem Mikroskop im Labor, wenn eine Stahlprobe aufgeschnitten wird. In den Anlagen werden deshalb regelmässig Ultraschall- und Wirbelstromprüfungen durchgeführt, um mögliche Haarrisse zu entdecken, bevor sie eine für die Sicherheit kritische Grösse erreichen.

Die Experten am PSI können den Zustand der Stähle in den Schweizer Atomkraftwerken gut abschätzen. Beim Bau wurden beispielsweise Stahlproben im Reaktorinnern in der Nähe des Kerns platziert. Nach und nach werden diese Proben entnommen und im Hotlabor des PSI getestet. Dabei werden mit einem Hammer gekerbte Metallproben zerschlagen. Diese Tests liefern im Voraus einen Hinweis über die Strah-

lenschädigung und den zukünftigen Versprödungsgrad des Druckgefässes. Der an sich einfache Versuch wird allerdings erschwert durch die Radioaktivität: Dicke Wände aus Beton und Fenster aus Bleiglas schützen die Wissenschaftler vor der Strahlung. Über Roboterarme manipulieren sie das Metall.

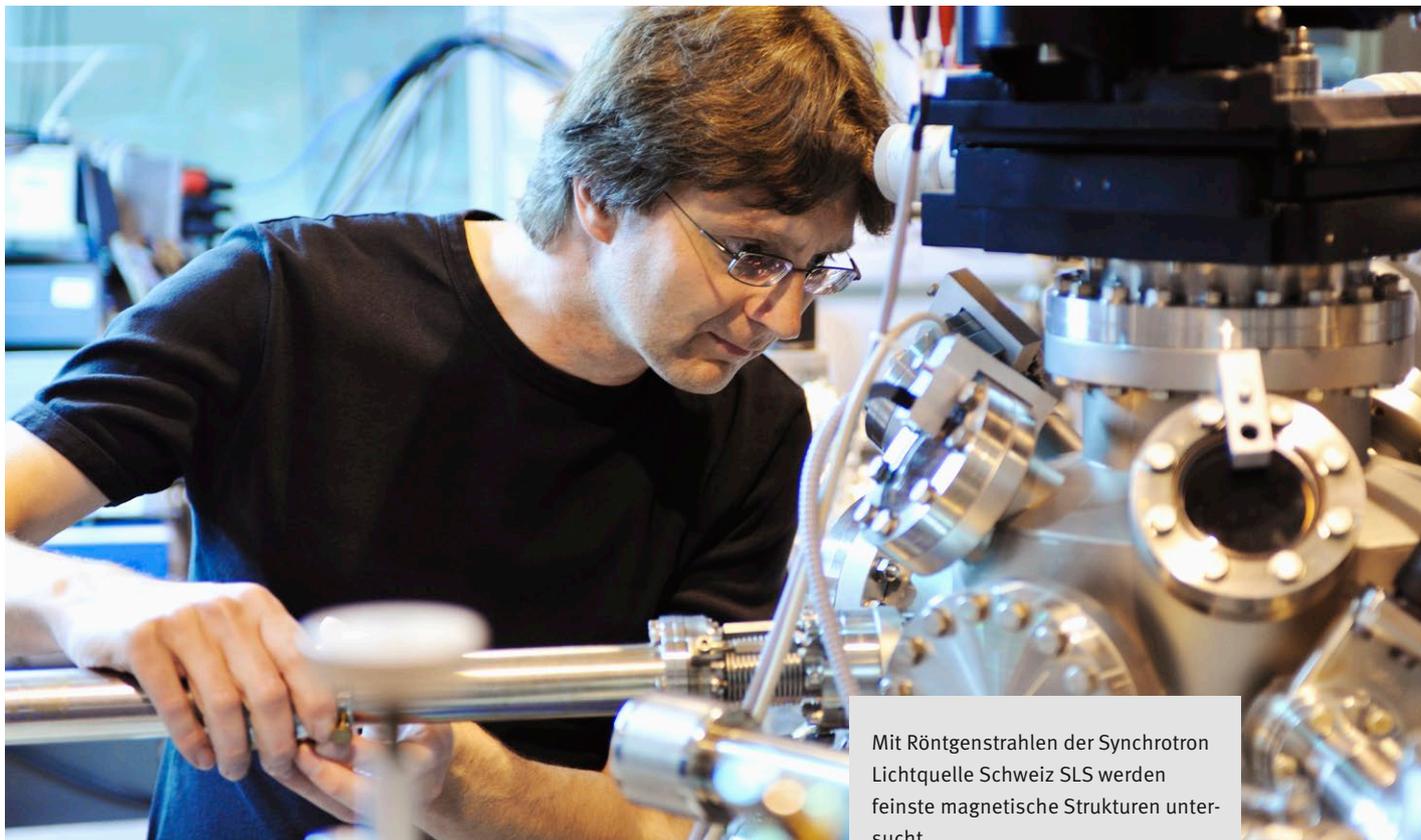
Kühlwasser muss rein sein

Weitaus häufiger als im Reaktorgefäss entsteht Korrosion an Schweissnähten der Kühlleitungen. Ein Grund dafür ist, dass jede Schweissnaht zu mechanischen Spannungen führt: Das Metall schmilzt beim Schweiessen und zieht sich beim Abkühlen zusammen. Diese Zugspannung bleibt im Metall erhalten und kann über die Jahre zu Spannungsrisskorrosion führen. Wie beim Hallenbad Uster sind es unter anderem Chloratome, die den Prozess beschleunigen. Das Chlor stammt vom Salz, das im Kühlwasser in geringsten Mengen enthalten ist.

In den 1980er-Jahren erkannten die Wissenschaftler diese Zusammenhänge und seitdem wird das Kühlwasser für Kernkraftwerke noch sorgfältiger aufbereitet. Im Vergleich zu Trinkwasser enthält es mindestens 1000-mal weniger Chloratome. Gleichzeitig werden neue Schweissverfahren angewendet, die nicht zu einer Zug-, sondern zu einer Druckspannung an der Metalloberfläche führen. Dies verhindert ebenfalls die Spannungsrisskorrosion.

Um Korrosion zu vermeiden, werden heute also nicht etwa grundlegend neue Materialien verwendet. Ein schonender Betrieb, bei Kernanlagen etwa bezüglich Kühlwasser und Temperatursprüngen, sowie die fachgerechte und kontrollierte Verarbeitung der Stähle sind entscheidend. So müssen beispielsweise Schweissnähte sorgfältig geschliffen und poliert werden. Die Verarbeitung entscheidet mit, ob hier nach 30 Jahren Risse auftreten werden.

Informationen speichern



Mit Röntgenstrahlen der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS werden feinste magnetische Strukturen untersucht.

Computer, Digitalkameras, MP3-Player und Smartphones gehören heute zum Alltag. Sie produzieren Unmengen von Daten, die gespeichert werden müssen – sei es im Rechenzentrum oder zu Hause auf der Festplatte.

Der Computer speichert seine Informationen auf einer Festplatte. Vom Prinzip her funktioniert diese wie eine Tonbandkassette: Ein magnetisches Band wird von einem Tonkopf ausgelesen. Nur dass sich auf der Festplatte das magnetische Material auf einer sich drehenden Scheibe befindet und der

Lesekopf an eine beliebige Stelle gefahren werden kann, ohne dass das Band vorwärts oder rückwärts gespult werden muss.

Die erste kommerzielle Festplatte von IBM war 1956 so gross wie ein Schrank und wog eine halbe Tonne. Als sich in den 1980er-Jahren die Personal Computer verbreiteten, wurden die rund 15 cm breiten Festplatten bereits in die PCs eingebaut. Sie speicherten 10 Megabyte. Dies entspricht der Datenmenge von ein bis drei digitalen Bildern, wie sie eine heutige Kamera aufnimmt. Eine moderne Festplatte ist

nur noch halb so breit und speichert mehr als ein Terabyte, das sind 100 000 bis 300 000 Bilder.

Bei so viel Information auf so wenig Raum muss der Platz, auf dem ein einzelnes Bit – also eine einzelne Information – gespeichert wird, immer kleiner werden. Je kleiner aber diese Speicherzellen, desto grösser ist die Gefahr, dass die Magnetisierung zufällig verändert wird, etwa durch Magnetfelder in der Umgebung oder sogar durch die Wärme der Festplatte. Denn Wärme bedeutet auf atomarer Ebene nichts anderes als Bewegung.

Magnetische Materialien

Forschungsinstitute, darunter das PSI, arbeiten deshalb an neuen magnetischen Materialien für Festplatten. Sie sollen derart beschaffen sein, dass ein möglichst hohes Magnetfeld nötig ist, um die magnetischen Strukturen auf der Festplatte – in denen letztendlich die gespeicherte Information liegt – zu ändern. Typischerweise handelt es sich bei solchen Materialien um Kombinationen von Eisen, Kobalt und Nickel, wozu noch weitere Stoffe beigemischt werden. Als dünne Filme werden verschiedene Schichten gestapelt und so deren magnetische Eigenschaften gezielt beeinflusst.

Dabei können sich die einzelnen Schichten ganz anders verhalten als das gestapelte System insgesamt. Somit verändert sich auch der Beitrag der verschiedenen Atome, sei es nun Ei-

sen, Kobalt oder Nickel. Die Spezialität der Forschenden am PSI ist es, den Einfluss der einzelnen Metalle in den verschiedenen Schichten zu messen. Zudem können sie die feinen Strukturen und deren magnetische Ausrichtung am Bildschirm darstellen.

Sie nutzen dazu Röntgenstrahlen aus der Synchrotronlichtquelle Schweiz SLS. Damit sie die dünnen Schichten messen können, werden schwache Röntgenstrahlen verwendet. So schwach, dass sie in der Luft nach wenigen Millimetern absorbiert werden. Die Experimente finden deshalb unter Luftausschluss im Vakuum statt. Die Röntgenstrahlen treffen auf das Material und lösen einzelne Elektronen aus den Atomen heraus. Diese Elektronen werden mit einem Detektor gemessen und mit einer Software ausgewertet. Als Ergebnis erhalten die Forscher ein Bild der magnetisierten Zellen.

Feinste Strukturen

Je nach Wellenlänge reagieren die Röntgenstrahlen mit Atomen unterschiedlicher Materialien. Entsprechend können die Forscherinnen und Forscher mit der Wahl der Wellenlänge gezielt die Magnetisierung von Eisen, Kobalt oder Nickel betrachten. Eine der Schwierigkeiten liegt allerdings darin, dass die Strukturen oft nur wenige Nanometer gross sind und die Form das magnetische Verhalten beeinflusst. Zum Vergleich: Im Schnitt wachsen unsere Haare pro Sekunde einige Nanometer. Um diese winzigen Strukturen zu untersuchen, kombinieren die Forscher am PSI verschiedene mikroskopische Methoden und verwenden modernste nanolithografische Verfahren.

Die Wissenschaftler arbeiten nicht nur daran, die Speicherzellen zu verkleinern, sie suchen auch Methoden, um die Informationen schneller zu lesen und/oder zu speichern. Neuste Erkenntnisse zeigen, dass ein Laser die magnetische Ausrichtung einer Speicherzelle verändern kann. Diese neuen Entwicklungen eröffnen ungeahnte Möglichkeiten, und die Computer der nächsten Generation werden uns kaum noch an die «guten alten PCs» erinnern.



Blick in die Hochvakuumkammer. Die Probe befindet sich hinter dem mittleren Fenster. Die vielen Anschlüsse und Fenster der Kammer erlauben die präzise Platzierung und Manipulation der Probe.

Spintronik für schnelle Computer

In den 1920er-Jahren entdeckten Physiker den Elektronenspin. Heute, rund 90 Jahre später, wird der Effekt in Festplatten genutzt. Wissenschaftler liebäugeln damit, ganze Computer zu bauen, die auf diesem Effekt beruhen, denn Spintronik ist schnell und braucht wenig Energie.

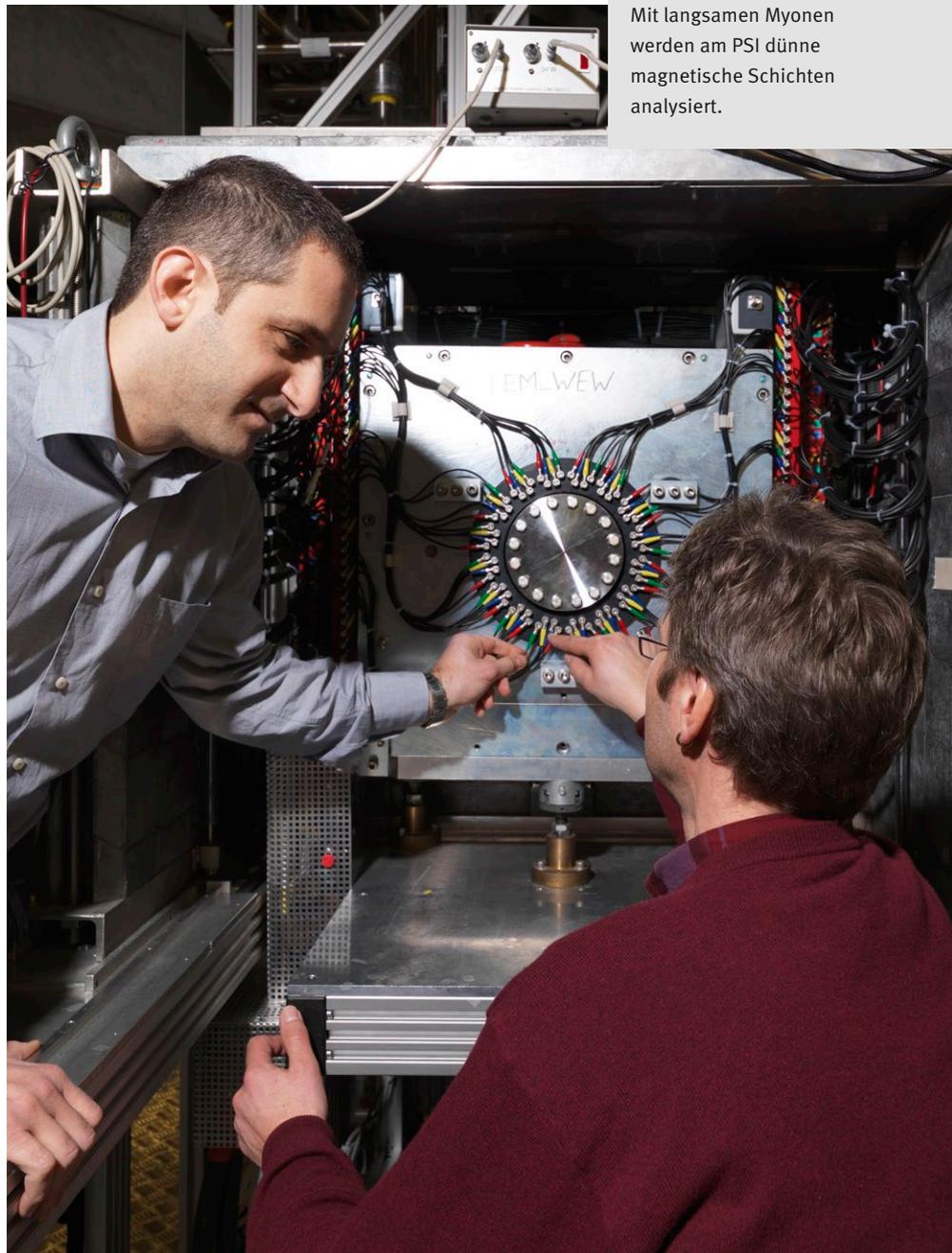
Informatiker sprechen schon mal vom Pizza-Ofen, wenn sie die 19-Zoll-Schränke meinen, in denen die Computer in den Rechenzentren gestapelt sind. Nicht nur, weil die Computer darin die Form einer Pizzaschachtel haben, sondern auch, weil es so heiss wird wie in einem Ofen. Ein moderner Computerchip entwickelt gleich viel Wärme wie eine Herdplatte auf der gleichen Fläche.

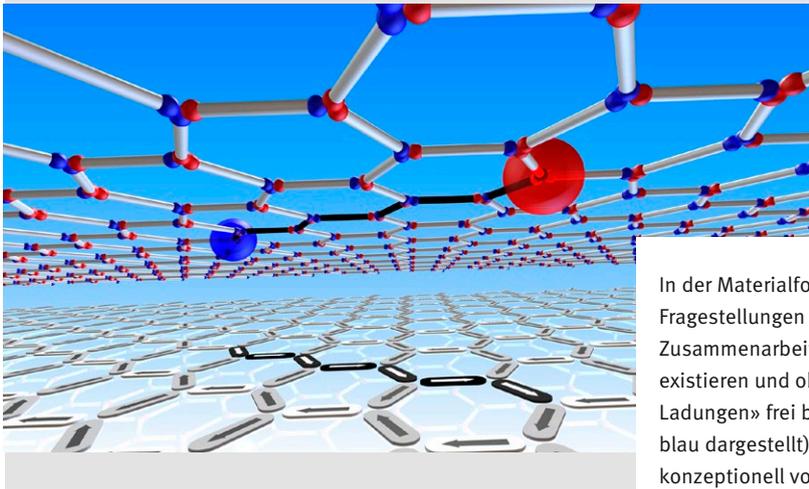
Die Elektronik von morgen soll deshalb nicht nur kleiner und schneller werden, sondern in erster Linie weniger Energie verbrauchen. Dies geht aber nicht, ohne am fundamentalen Prinzip des Computers etwas zu ändern. Das wichtigste Element sind die Transistoren, die einen Strom schalten. Genau diese Transistoren erzeugen die Wärme: Um den Strom zu unterbrechen, verdrängen sie die beweglichen Elektronen in einem Stück Leitung auf dem Computerchip. Jetzt kann kein Strom mehr fließen. Verhält sich der Transistor passiv, kehren die beweglichen Elektronen zurück und der Strom fließt wieder. Bei diesem ständigen Verdrängen und Zurückholen der Elektronen entstehen Stromverluste, die in Wärme umgewandelt werden, sodass der Chip heiss wird.

Spin trägt Information

Statt Elektronen zu verdrängen, wollen Wissenschaftler in den Computern von morgen eine Eigenschaft der Elektronen ausnutzen, die bisher nicht genutzt

Mit langsamen Myonen werden am PSI dünne magnetische Schichten analysiert.





In der Materialforschung werden auch ganz grundsätzliche Fragestellungen behandelt. In einer internationalen Zusammenarbeit beispielsweise, ob magnetische Monopole existieren und ob sich diese einzelnen «magnetischen Ladungen» frei bewegen könnten (in der Illustration rot und blau dargestellt). Diese Ergebnisse sind nicht nur rein konzeptionell von Interesse, sondern könnten auch die Grundlage für die Entwicklung zukünftiger auf Spintronik basierender elektronischer Geräte bilden.



wurde: den Spin. Bildlich gesprochen dreht sich das Elektron in die eine oder andere Richtung um die eigene Achse. Die beiden Zustände werden Spin-Up oder Spin-Down genannt. Das Entscheidende ist nun, dass der Spin nicht nur schnell verändert werden kann, sondern dass dieser Vorgang auch viel weniger Energie benötigt als notwendig ist, um das Elektron zu bewegen. Die Wissenschaftler sprechen von Spintronik. Erste Spintronik-Elemente befinden sich in jedem modernen Computer: im Lesekopf der Festplatte. Ursprünglich wurde hier eine kleine Drahtspule genutzt, um magnetische Zellen auszullesen. Je kleiner aber die Zellen wurden, desto kleiner wurden die Spannungen in den Spulen, die detektiert werden mussten. Schliesslich war keine Messung mehr möglich. Heute wird anstelle dieser magnetischen Induktion der Elektronenspin genutzt. Er richtet sich am Magnetfeld des Materials aus, durch das sich das Elektron bewegt: Die Elektronen werden zuerst im Lesekopf durch eine fest magnetisierte Schicht ausgerichtet. Dann bewegen sie sich durch eine Schicht, die die Magnetisierungsrichtung der Speicherzelle übernimmt. Ist diese Schicht gleich ausgerichtet wie die Elektronen, passieren sie ohne nennenswerten Widerstand. Ist die Schicht hingegen in die andere Richtung ausgerichtet, werden die Elektronen leicht gehindert

und müssen den Spin ändern. So detektiert der Lesekopf die Magnetisierungsrichtung auf der Festplatte. Dieser Effekt mit dem Namen «Riesenmagnetowiderstand» wurde 1988 von Forschern in Deutschland und Frankreich entdeckt. 2007 gab es dafür den Nobelpreis für Physik.

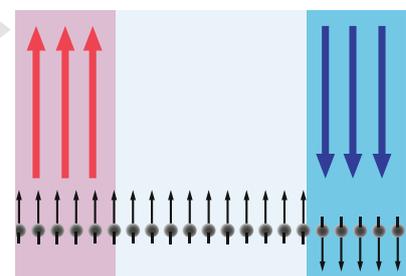
Nur am PSI langsam genug

Wissenschaftler arbeiten weltweit an verbesserten Schichten für Leseköpfe und an transistorähnlichen Elementen, woraus ein zukünftiger Computer hergestellt werden könnte. Eine Schwierigkeit besteht darin, die Magnetisierungsrichtungen in diesen komplexen Schichtsystemen zu analysieren. Darauf hat sich das PSI spezialisiert: Die Forscher messen die Magnetisierung in einer bestimmten Tiefe mithilfe von langsamen Myonen.

Myonen sind Elementarteilchen, die künstlich hergestellt werden. Sie zerfallen nach wenigen Mikrosekunden. Genau diesen Zerfall nutzen die Wissenschaftler: Das Myon bleibt in der Materialprobe stecken und sein Spin richtet sich am Magnetfeld aus. Dann zerfällt es und sendet in die Richtung seines Spins ein Teilchen aus, das detektiert wird.

Mit Myonen arbeiten mehrere Forschungsgruppen weltweit. Für magnetische Schichten liegt die Schwierigkeit darin, genügend langsame Myonen herzustellen. Normale Quellen senden zu schnelle Myonen, die zu tief ins Material eindringen. Zudem variiert die Eindringtiefe stark. Die Forscher am PSI sind weltweit die Einzigen, die Myonen herstellen können, die langsam genug sind, um die Schichten von Spintronik-Elementen zu analysieren. Entsprechend häufig besuchen Forschungsgruppen aus aller Welt die Anlage in der Schweiz.

Innenleben eines spintronischen Bauteils. Die beiden äusseren Schichten sind magnetisiert, der elektrische Strom fließt von links nach rechts. Wenn rechte und linke Schicht entgegengesetzt magnetisiert sind, muss der Spin der Elektronen (als Kügelchen dargestellt) auf dem Weg umklappen, was den Stromfluss bremst und als elektrischer Widerstand erscheint.



Die Kabel der Zukunft

Seit 100 Jahren sind Supraleiter bekannt. Weil das Phänomen nur bei sehr tiefen Temperaturen auftritt, blieben Anwendungen lange der Forschung vorbehalten. Mit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung 1986 rückte die Hoffnung auf neue industrielle Anwendungen wieder in den Vordergrund. Doch noch ist der Mechanismus, der zur Hochtemperatur-Supraleitung führt, nicht vollständig verstanden. Somit fehlt die wichtige Grundlage, mit der gezielt nach neuen, besseren Supraleitern gesucht werden kann.

Supraleitende Materialien leiten Strom ohne Widerstand. Dazu müssen sie unter ihre sogenannte Sprungtemperatur abgekühlt werden. Diese liegt je nach Material bei bis zu -269 °C . So tiefe Temperaturen erreicht man durch Kühlung mit flüssigem Helium. Das ist aber aufwendig und teuer.

Im Forschungslabor der IBM Schweiz in Rüschlikon wurden 1986 die ersten Hochtemperatur-Supraleiter entdeckt. Ein bekannter Vertreter dieser Klasse ist Yttrium-Barium-Kupferoxid mit einer Sprungtemperatur von -180 °C . Interessant daran ist, dass die Temperatur über dem Siedepunkt von Stickstoff (-196 °C) liegt. Flüssiger Stickstoff ist billiger und in der Handhabung einfa-

cher als flüssiges Helium. Das eröffnet ein weites Feld von Anwendungen.

Supraleiter im Einsatz

Ein wichtiges Anwendungsgebiet für Supraleiter sind starke Elektromagnete, wie sie auch in einigen Beschleunigeranlagen des PSI zum Einsatz kommen. Beispielsweise für die Produktion der Protonen zur Behandlung von bestimmten Krebserkrankungen (Protonentherapie).

Die in diesen Elektromagneten zum Einsatz kommenden Magnetspulen werden aus kilometerlangen und nur wenige Mikrometer dünnen Supralei-

Mit Neutronen sind Forscher des PSI den Geheimnissen der Hochtemperatur-Supraleitung auf der Spur.



Die Supraleitung manifestiert sich auch im Meissner-Effekt, durch den der mit einem Supraleiter beladene Modellzug über einem Magneten schwebt.



terfäden hergestellt. Hochtemperatur-Supraleiter bestehen aber aus keramischem Material, sind also spröde und schwierig zu verarbeiten. Deshalb verwendet man für Elektromagneten klassische Tieftemperatur-Supraleiter, die aus Metalllegierungen bestehen. Die Spulen werden in sich geschlossen, und der Strom kann unendlich lange und verlustfrei seine Runden drehen. Zum Laden der Spule wird ein kurzes Teilstück über die Sprungtemperatur geheizt. Über Zuleitungen wird ein Strom eingespeist. Wenn die gewünschte Stromstärke erreicht ist, wird das Teilstück wieder gekühlt und so der Kreis wieder geschlossen. Um das Magnetfeld zu erhalten, muss nur regelmässig flüssiges Helium nachgefüllt werden, wie das in der Praxis bereits geschieht: Ein Beispiel sind Geräte zur Magnetresonanztomografie (MRI), wie sie in der Medizin eingesetzt werden. Eine weitere Eigenschaft, die man sich zunutze machen kann, ist die hohe Stromdichte von Supraleitern. Um den gleichen Strom zu transportieren wie mit einem Kupferdraht, kann ein Supraleiter mit viel geringerem Querschnitt eingesetzt werden. Solche Kabel aus Hochtemperatur-Supraleitern können mit Stickstoff gekühlt werden. Berücksichtigt man die Isolation der Kabel inklusive Kühlung, übertragen sie noch immer die fünffache Strommenge im Vergleich zu einem gleich dicken Kupferkabel. Allerdings sind sie rund sechs- bis achtmal teurer. Seit April 2008 liegen 660 Meter eines solchen Kabels in den USA auf Long Island, New York im Stromnetz. In Metropolen ist für zusätzliche Kupferleitungen oft schlicht kein Platz mehr vorhanden. Da

kann sich der Einsatz von teuren Supraleiterkabeln lohnen.

Dem Phänomen auf der Spur

Während klassische Tieftemperatur-Supraleiter heute gut verstanden sind, ist das Phänomen der Hochtemperatur-Supraleitung noch nicht abschliessend geklärt. Forscher am PSI untersuchen Supraleiter, um besser zu verstehen, wie sie aufgebaut sind. Dazu schiessen sie beispielsweise Neutronen auf Materialproben und können so die Position der Atome und die elektronischen Eigenschaften des Supraleiters bestimmen. Bei normalen Leitern entsteht der elektrische Widerstand durch Kollisionen der Elektronen im Material. Als Vergleich kann hier die Situation herangezogen werden, wie sie auf einer stark befahrenen, mehrspurigen Hauptverkehrsachse durch Zürich, ohne Verkehrssignalisation, entstehen würde. Immer wieder müssten Verkehrstreifen aufgrund von Unfällen gesperrt werden, und es käme zu Staus. Anders sieht es aus mit Verkehrssignalisation. Es kommt zu einer «Absprache»: Die Autos fahren alle zusammen los, verhalten sich im besten Fall als Kollektiv und profitieren so von der «grünen Welle» an der Ampel. Ähnlich kommt es in Supraleitern zu einer «Absprache» unter den Elektro-

nen, die so das Material widerstandslos passieren können. Im Gegensatz zur Tieftemperatur-Supraleitung ist bei der Hochtemperatur-Supraleitung noch unklar, wie es zu dieser «Absprache» kommt. Dass dabei ein Wechselspiel zwischen Supraleitung und Magnetismus eine wichtige Rolle zu spielen scheint, darin sind sich die Forscher mittlerweile schon fast sicher. Um das besser zu verstehen, stapeln Forscher am PSI abwechselnd verschiedene Schichten von Supraleitern und Magneten. Diese Proben werden mit Neutronen, Myonen oder Röntgenstrahlen auf ihre Eigenschaften untersucht. Mit den neuen Erkenntnissen hoffen die Wissenschaftler, dem Phänomen der Hochtemperatur-Supraleitung auf die Spur zu kommen und so die Grundlage zu schaffen, um die Eigenschaften von Supraleitern gezielt zu verbessern. Denkbar sind Materialien mit noch höheren Sprungtemperaturen, die einfacher und kostengünstiger gekühlt werden könnten. Als ferne Vision bleibt der Traum, überall dort Supraleiter einzusetzen, wo heute normale Kabel zum Einsatz kommen und unnötig viel Energie in Wärme verloren geht. Der Strom könnte verlustfrei über grosse Distanzen transportiert werden und liesse sich auf einfache Weise speichern. Zwei Aspekte die heute in der Nutzung erneuerbarer Energien grosse Herausforderungen darstellen.

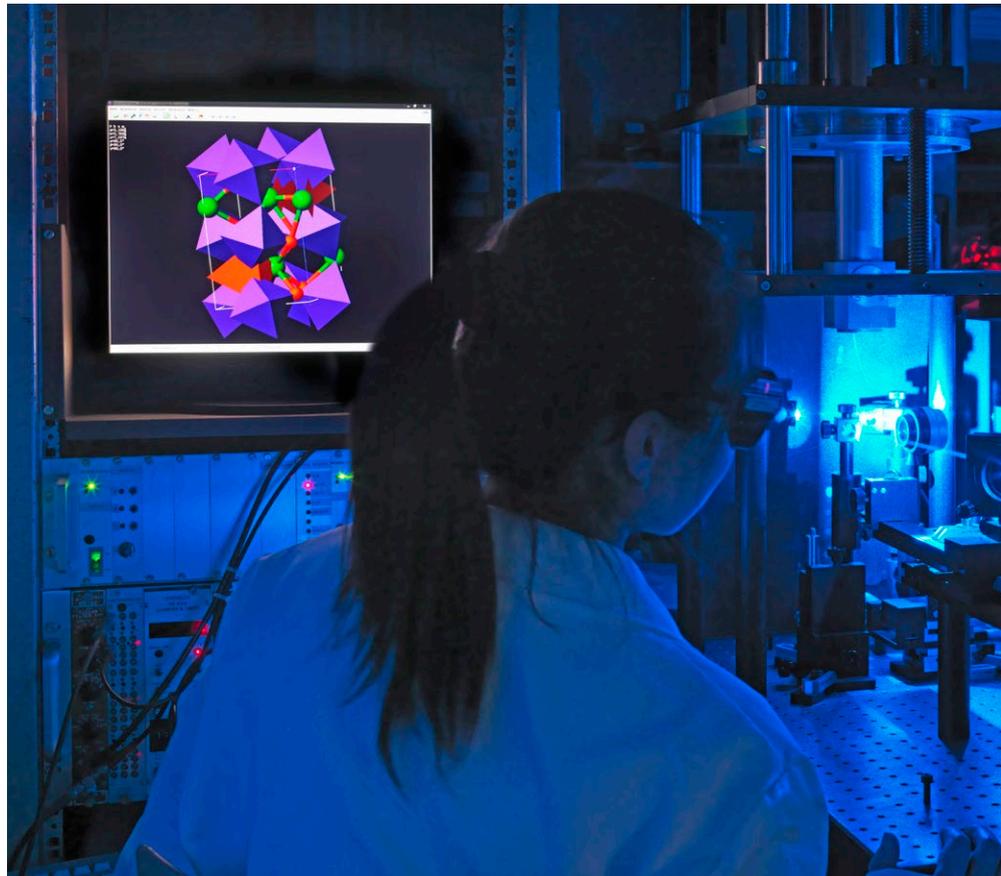
Magnete unter Spannung

Computer der Zukunft werden immense Speicherkapazität auf kleinstem Raum bieten. Daten wird man viel schneller abrufen können, und nach einem Stromausfall wird niemand Daten vermissen, sie werden erhalten bleiben. Forscher arbeiten heute an den Grundlagen für solche Systeme.

Mit dem Kompass – eine der ältesten Anwendungen – war Ferromagnetismus schon im alten China bekannt. Ferromagnetische Werkstoffe sind zunächst nicht magnetisch, sie lassen sich aber in einem starken äusseren Magnetfeld magnetisieren. Wird das Feld wieder entfernt, bleibt ein Teil der Magnetisierung im Material erhalten – so richtet sich später die magnetisierte Kompassnadel nach dem Erdmagnetfeld aus. Derselbe Effekt wird auf Festplatten in Computern ausgenutzt, um Information zu speichern und wieder auszulesen. Neben dem Magnetismus existieren noch weitere ferroische Phänomene, beispielsweise Ferro- oder Piezoelektrizität. Eine bekannte Anwendung des piezoelektrischen Effekts ist das Piezofeuzeug: Durch Betätigung des Tasters wird ein Stößel auf einen Piezokristall geschlagen. Durch die Verformung des Kristalls entsteht eine Spannung von bis zu 15 Kilovolt, die sich über zwei mit dem Kristall verbundene Metallkontakte entlädt – es entsteht ein elektrischer Funke, der das aus dem Feuerzeug ausströmende Gas entzündet.

Eigenschaften kombinieren

Magnetismus und Ferroelektrizität sind Materialeigenschaften, die in der Natur



üblicherweise nicht zusammen vorkommen. Die Wissenschaftler stellen sich folgende Fragen: Gibt es trotzdem Materialien, sogenannte Multiferroika, die beide Eigenschaften vereinen? Und wenn ja: Wie stark ist der Effekt und ist er für Anwendungen nutzbar? Dabei ist der magnetoelektrische Effekt besonders interessant: Mit einer elektrischen Spannung kann die magnetische Ordnung verändert werden – und umgekehrt, mit einem magnetischen Feld die ferroelektrische Ordnung. Wenn man also das Material in ein Magnetfeld bringt, ist eine elektrische Spannung

messbar. Erste Forschungsprojekte fanden bereits vor 50 Jahren in der ehemaligen Sowjetunion statt. Damals haben Physiker Materialien untersucht, bei denen Magnetismus und Ferroelektrizität zusammen vorgekommen sind. Der gefundene Effekt war allerdings sehr klein und dadurch für Anwendungen nicht interessant genug. Allgemein wären Speichermedien eine mögliche Anwendung dieser multiferroischen Materialien. Auf einer herkömmlichen Festplatte werden Informationen in Bits gespeichert. Man kann sich jedes Bit als winzigen Stab-

Nebst Messungen an Grossanlagen werden Materialien am PSI auch mit optischen Methoden untersucht, wie hier an einem Ramanspektrometer.



magneten vorstellen. Wenn der Nordpol nach oben zeigt, ist es eine digitale Eins, zeigt er nach unten, eine digitale Null. Auf einer Festplatte befinden sich Milliarden solcher Bits. Die Daten werden mit einem Strom über einen magnetischen Schreib-Lesekopf eingeschrieben oder ausgelesen. Multiferroika besitzen dieselbe Grundstruktur, mit dem Unterschied, dass die magnetischen Bits hier durch das Anlegen einer elektrischen Spannung beeinflusst werden können. So kann der Speicher direkt beschrieben und ausgelesen werden, ohne dass ein

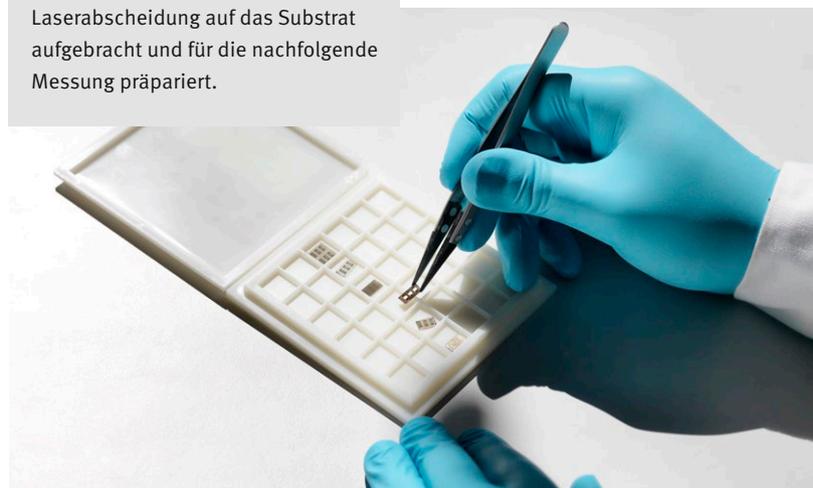
Magnetfeld erzeugt oder detektiert werden muss. Das funktioniert viel schneller als das Schreiben in herkömmlichen Festplatten und braucht weniger Energie. Zudem würden die beweglichen Teile in einer Festplatte wegfallen. Es wären keine schnell rotierenden, vibrationsempfindlichen Scheiben mehr nötig.

Die Forschung steht am Anfang

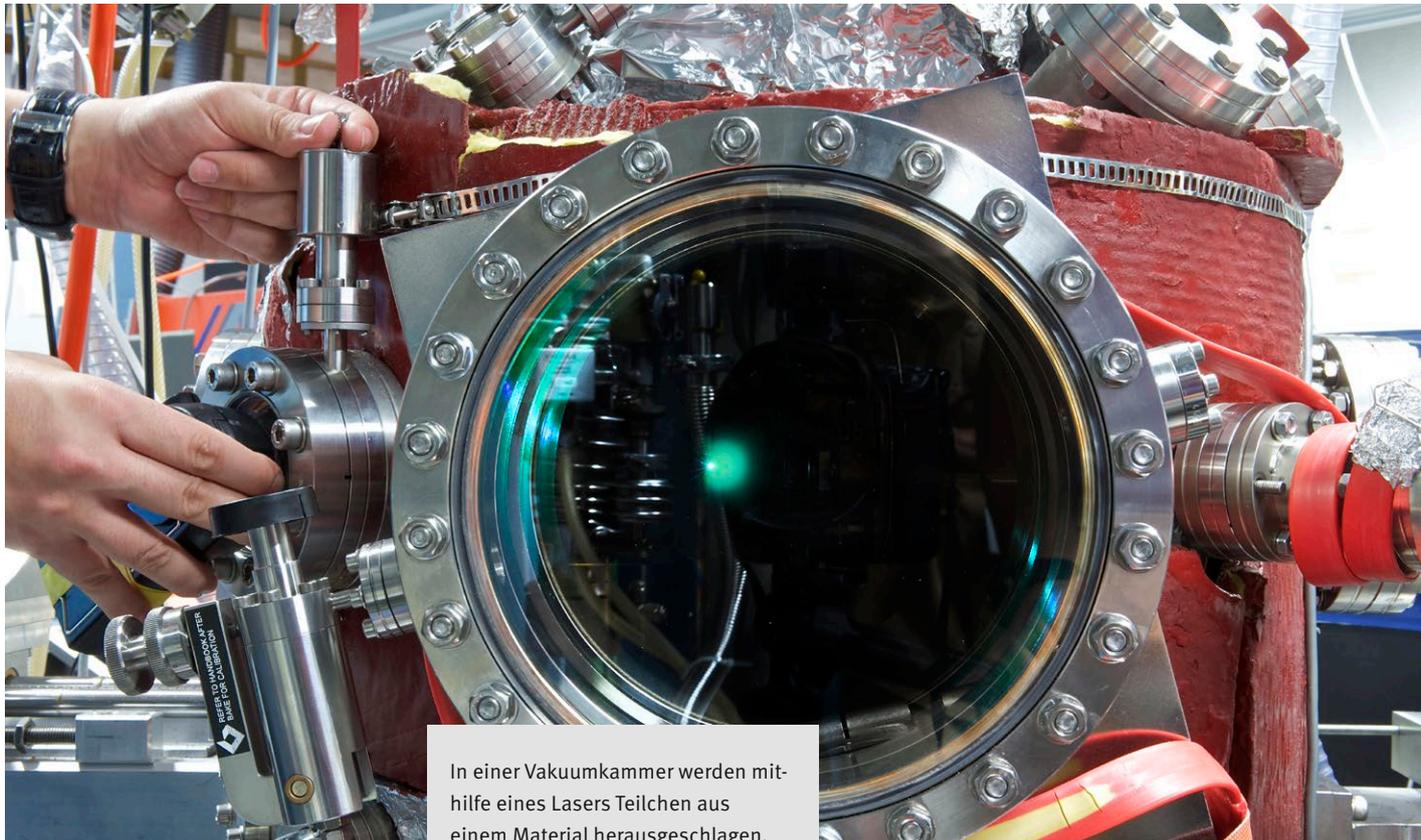
Für ihre Untersuchungen verwenden die Wissenschaftler am PSI neben dicken Proben auch dünne Filme multiferroischer Materialien, abhängig davon, ob man diese in der einen oder anderen Form überhaupt herstellen kann und welche Eigenschaften im

Einzelnen untersucht werden sollen. Im Falle dünner Schichten stellen die sehr kleinen Materialvolumen – etwa 100 000-mal kleiner als ein einzelner Wassertropfen – eine grosse Herausforderung für die Messungen dar. Zusätzlich sind die meisten dieser Materialien Isolatoren, was bedeutet, dass man den elektrischen Widerstand nicht einfach messen kann. Aus diesen Gründen muss diese Klasse von Materialien auch an Grossanlagen mit Neutronen, Myonen oder Röntgenstrahlung untersucht werden, um Aufschluss über elektronische Eigenschaften und den Magnetismus zu erhalten. Die Forschung auf diesem Gebiet ist noch jung. Doch wenn die Wissenschaftler in naher Zukunft verstehen werden, wie das vielfältige Zusammenspiel zwischen Magnetismus und Ferroelektrizität in diesen Materialien zustande kommt, werden sie in der Lage sein, gezielt Materialien mit neuen Eigenschaften herzustellen. Das könnte völlig neue Anwendungen ermöglichen.

Auf Einkristallen aufgebrachte dünne Schichten. Die multiferroischen Materialien werden mit gepulster Laserabscheidung auf das Substrat aufgebracht und für die nachfolgende Messung präpariert.



Auf die Details im Innern kommt es an



In einer Vakuumkammer werden mithilfe eines Lasers Teilchen aus einem Material herausgeschlagen. Auf ihrem Weg vom Material zum Probenträger (von links nach rechts) strahlen die Teilchen grünes Licht aus.

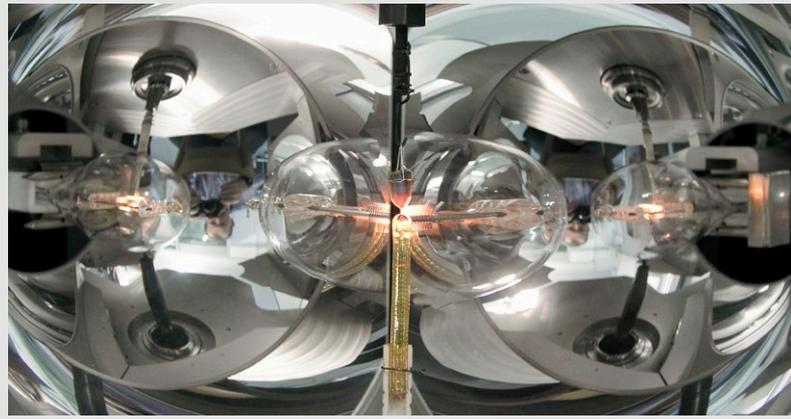
Eine interessante Materialeigenschaft zu entdecken, ist das eine. Sie auch zu verstehen, ist das andere. Für die Experimente, mit denen man den Eigenschaften auf den Grund geht, benötigt man das Material in Reinform, denn kleinste Abweichungen von der Idealstruktur können sein Verhalten grundlegend verändern. Man muss also Proben herstellen können, in denen Milliarden von Milliarden von Materiebausteinen genau nach dem vorgegebenen Bauplan angeordnet sind. Und das ist eine Kunst für sich.

Es sind ihre neuartigen Eigenschaften, die neue Materialien für die Anwendun-

gen interessant machen – etwa die Fähigkeit der Supraleiter, Strom ganz ohne elektrischen Widerstand zu leiten. So nützlich diese Eigenschaften zustande kommen. Um das Geheimnis zu entschlüsseln, studieren Forschende die Vorgänge im Inneren des Materials und beobachten, was auf der Ebene der kleinsten Bausteine – einzelner

Atome und Elektronen – geschieht. Die Fachleute nennen dies die Bestimmung der statischen und dynamischen Struktur des Materials. Und dafür wiederum brauchen sie einen passenden Untersuchungsgegenstand – eine Probe. Eine solche herzustellen ist gar nicht einfach, denn sie darf nur gerade das Material enthalten, das interessiert. Man will nur die Eigenschaften dieses Materials sehen und nicht diejenigen einer anderen beigemischten Substanz. Dabei kommt es nicht nur darauf an, dass man die richtigen Bestandteile nutzt, sie müssen auch genau nach Bauplan angeordnet sein. Denn jede kleine Abweichung kann unerwünschte

Blick in das ca. 40 cm breite Innere eines Spiegelofens zur Herstellung von grossen Einkristallen. Mithilfe von fokussiertem Licht wird ein im Zentrum eingespannter polykristalliner Zylinder geschmolzen, aus dem ein Einkristall entsteht.



Effekte hervorrufen. Höchstens einige wenige Bausteine unter einer Milliarde dürfen verkehrt sein. Das ist so, als tolerierte man in einer Bibliothek mit mehreren tausend Bänden nur einige wenige Tippfehler, ansonsten die gesamte Bibliothek wertlos würde.

Perfekte Kristalle züchten

Forschende haben viele Verfahren entwickelt, um die passenden Proben herzustellen – zum Beispiel, um Kristalle zu erzeugen. Wobei sie jedes Material als Kristall bezeichnen, in dem die Bausteine in einem regelmässigen, sich wiederholenden Muster angeordnet sind. Gewöhnlich bestehen kristalline Materialien aus vielen kleinen Kristallen, die verschieden ausgerichtet sind – das gilt etwa für die Metalle, aus denen viele Geräte aufgebaut sind. Um ein solches «polykristallines» Material herzustellen, fangen die Forschenden in der Regel mit einem Zustand völliger Unordnung an – mit dem geschmolzenen Material, in dem kein Atom an seinem Platz ist. Kühlt man dieses Material ab, ordnen sich die Atome innerhalb ihrer Umgebung in der Kristallstruktur an. Die winzigen Kristalle, die dabei an verschiedenen Stellen entstehen, wachsen in verschiedene Richtungen und passen – wenn sie aufeinandertreffen – nicht zusammen.

Für viele Experimente reicht eine solche polykristalline Probe völlig aus. Bisweilen ist die Unordnung aber schädlich, denn sie kann die eigentlichen Eigenschaften des Materials verschleiern. So können etwa die Grenzen zwischen den

einzelnen Minikristallen elektrischen Strom ausbremsen, sodass man übersieht, dass das Material den Strom an sich hervorragend leitet. In diesen Fällen brauchen die Forschenden Einkristalle – also grössere Stücke des Materials, in denen sich die Kristallstruktur ungestört fortsetzt. Ein Weg, einen solchen Einkristall herzustellen, besteht darin, mit einem kleinen Zylinder aus polykristallinem Material – etwa in der Grösse eines Filzstifts – anzufangen. In diesem schmilzt man mithilfe sehr intensiven Lichts zunächst eine dünne Schicht am äussersten Ende und lässt diese langsam wieder fest werden. Dabei bekommen die Atome genug Zeit, um sich in der idealen Kristallstruktur anzuordnen. Dann schmilzt man die nächste Schicht genau darüber. Deren Atome fügen sich dann in die von der unteren Schicht vorgegebene Struktur ein. Hat man den ganzen Zylinder Schicht für Schicht geschmolzen und abkühlen lassen, sollte man darin schliesslich eine ideale durchgehende Kristallstruktur vorfinden. Ein oftmals langwieriger Prozess, der schon mal zwei Wochen dauern kann. Am Ende hat man aber einen hervorragenden Kristall – zum Beispiel aus einem supraleitenden oder multiferroischen Material. Dieser wird in der Regel in kleinere Stücke geschnitten, in deren Inneres man mit Neutronen oder Synchrotronlicht schauen kann.

Dünne Schichten schaffen Abhilfe

Auf diese Weise einen grossen Einkristall zu züchten, funktioniert nicht immer. Es gibt Materialien, bei denen die Schmelze zu flüssig ist. Andere schmelzen erst bei sehr hohen Temperaturen. So schmilzt Gallium bereits unterhalb von 30 Grad Celsius, Wolfram erst oberhalb von 3400 Grad. Um dennoch kristalline Proben aus diesen Materialien untersuchen zu können, wählen die Forschenden einen anderen Weg – sie machen sehr dünne Schichten.

Auch hier beginnen sie mit einem Zustand maximaler Unordnung: Sie verdampfen das Material. Hat man einen hinreichend starken Laser, geht das bei jedem Material – auch bei Wolfram. Das verdampfte Material setzt sich auf einer vorbereiteten, sehr flachen Unterlage ab. Wenn man es richtig macht, organisieren sich die Atome in der regelmässigen Kristallstruktur von selbst. Das Ganze geschieht natürlich im Vakuum, damit sich keine Luftmoleküle in die Probe drängeln. Das Ergebnis ist ein sehr dünner Kristall – im besten Fall mit 10 000 Atomschichten – rund ein tausendstel Millimeter dick, aber manchmal noch tausendmal dünner. Damit lassen sich zwar nicht alle denkbaren Experimente durchführen, Versuche mit Synchrotronlicht, Neutronen oder Myonen funktionieren aber oft gut und liefern Einblicke in Materialeigenschaften, wie sie etwa für die Spintronik oder die Supraleitung wichtig sind.

Die Werkzeuge der Wissenschaft

Je kleiner die Strukturen, desto grösser die Anlagen, um sie zu betrachten. Auf dem Gelände des PSI befinden sich gleich vier einzigartige Grossforschungsanlagen: die Synchrotronlichtquelle Schweiz SLS, die Schweizerische Spallations-Neutronenquelle SINQ, die Schweizerische Myonenquelle SpS und – als jüngste im Bunde – der Freielektronen-Röntgenlaser SwissFEL.

Materialwissenschaftler haben das Ziel, die Mechanismen grundsätzlich zu verstehen, die dazu führen, dass Materialien ganz spezielle Eigenschaften haben. Mit diesem Wissen können sie neue Materialien entwickeln oder bestehende verbessern. Die PSI-Wissenschaftler bestimmen die Materialeigenschaften mit einer Vielzahl unterschiedlicher Werkzeuge, vom Ohmmeter zur Messung des elektrischen Widerstands bis zu Instrumenten zur Messung der optischen Eigenschaften eines Materials. Neben diesen in vielen Labors des PSI vorhandenen und teilweise hoch spezialisierten Messgeräten benötigen die Forschenden auch Grossforschungsgeräte, ähnlich gigantischen Mikroskopen, mit denen sich tief ins Material hineinschauen lässt. Denn letztlich werden die Eigenschaften eines Materials von der Anordnung der Atome und den Kräfteverhältnissen zwischen ihnen bestimmt. Die Fachleute sprechen von der statischen und dynamischen Struktur eines Materials.

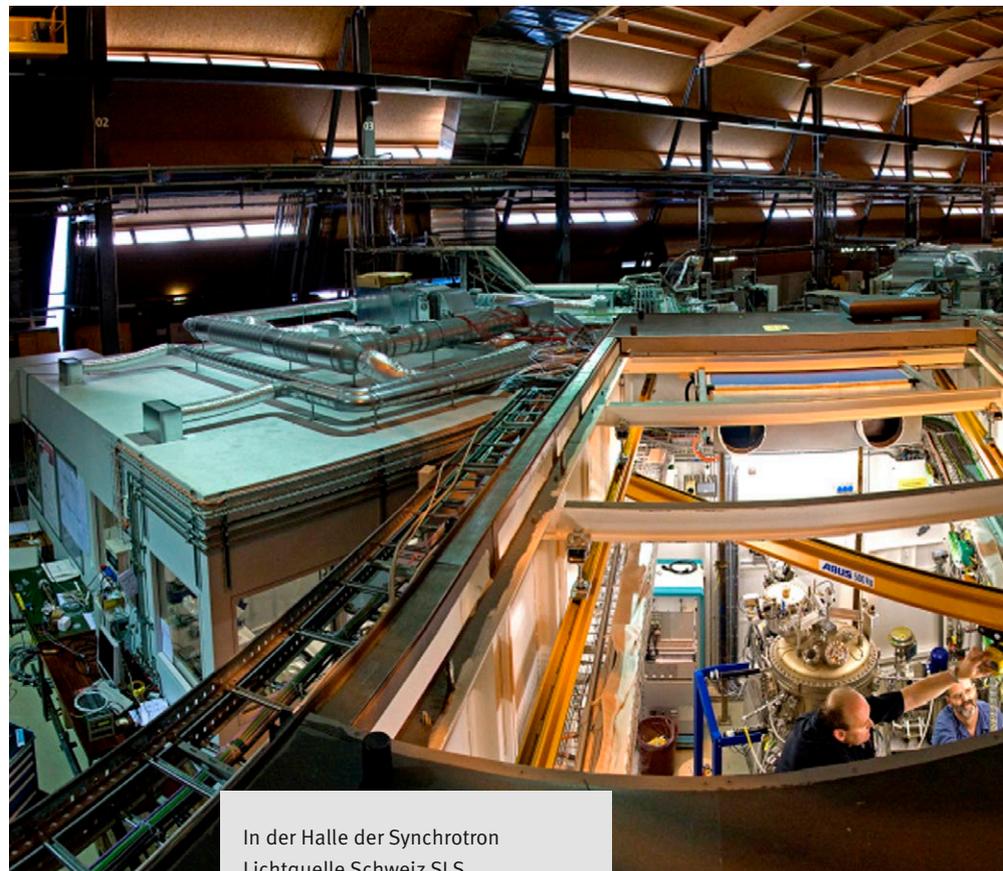
Synchrotronlicht

Der Wellenlängenbereich von sichtbarem Licht ist rund tausendmal grösser

als die atomaren Abstände in einem Material. Mit normalem Licht sieht man die Atome deshalb nicht, auch nicht mit den besten Vergrösserungslinsen. Die Forscher und Forscherinnen am PSI setzen deshalb die Synchrotronlichtquelle ein. Diese produziert für das Auge unsichtbares Licht mit sehr kurzer Wellenlänge, sogenannte Röntgenstrahlung. Röntgenstrahlen entstehen, wenn Elektronen stark abgebremst werden. Zuerst müssen die Elektronen also auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt werden. Dies geschieht wie in einem Röhrenfernseher: Elektronen, die einem glühenden Draht entspringen,

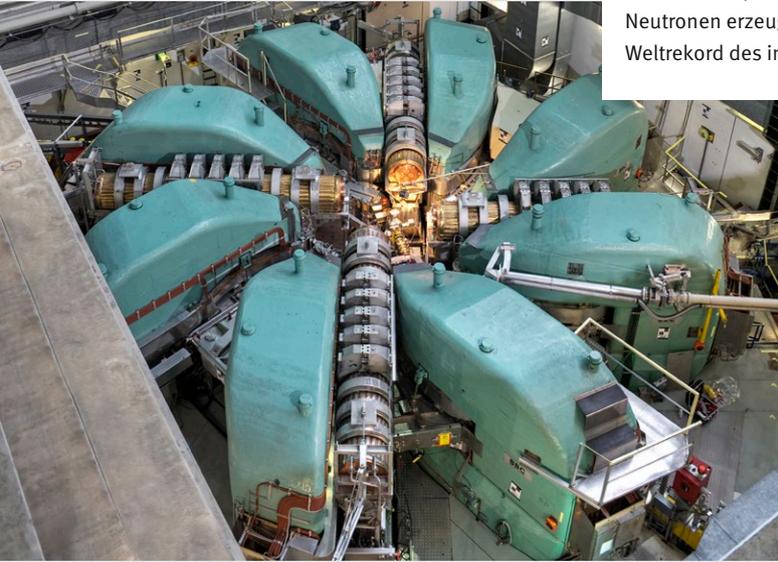
werden durch eine hohe Spannung zwischen zwei Metallplatten beschleunigt. Im Fernseher erzeugt dieser Strahl von Elektronen das Bild auf dem Bildschirm. In einem Röntgenapparat ist die Spannung höher, und die Elektronen prallen auf ein Metallstück. Dabei werden sie so stark abgebremst, dass Röntgenstrahlung entsteht.

Für die Materialforschung ist die Röntgenstrahlung konventioneller Geräte, wie sie beispielsweise von Ärzten verwendet werden, nicht für alle Zwecke genügend intensiv. Auch deckt sie keinen breiten, für viele Anwendungen notwendigen Wellenlängenbereich ab.



In der Halle der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS.

Der Protonenbeschleuniger des PSI. Mithilfe seines Strahls werden die für die Experimente am PSI notwendigen Myonen und Neutronen erzeugt. Seit den 70er-Jahren hält er ungebrochen den Weltrekord des intensivsten Protonenstrahls.



Daher werden die Elektronen für die SLS auf beinahe Lichtgeschwindigkeit gebracht. Anschliessend werden sie in einen Ring mit einem Umfang von knapp 300 Metern eingespeist. Hier

drehen sie im Innern einer Metallröhre ihre Runden, und zwar im Vakuum, damit sie nicht mit Luftmolekülen zusammenstossen. Jeweils nach kurzen, geraden Strecken folgen Magnete, die die Elektronen kurz in eine andere Richtung zwingen, um sie insgesamt auf einer Kreisbahn zu halten.

Die Elektronen sind so schnell, dass die Ablenkung durch die Magnete reicht, um Röntgenstrahlen – man spricht hier von Synchrotronlicht – zu erzeugen. Denn diese Ablenkung ist auch eine Beschleunigung, die – wie bei der Kollision von Elektronen mit einem Metallstück im konventionellen Röntgenapparat – zur Röntgenstrahlung führt. Seit ein paar Jahren setzen die Forscher am PSI noch raffiniertere Beschleunigungsstrecken ein: Abwechselnd angeordnete Magnete zwingen die Elektronen auf eine wellenförmige Bahn. Die Röntgenstrahlung wird dadurch besonders intensiv.

Die Synchrotronlichtquelle am PSI hat gegenüber Anlagen in anderen Forschungsinstituten den Vorteil, dass sie den Wissenschaftlern einen dauerhaft sehr stabilen Strahl zur Verfügung stellen kann. In vielen anderen Anlagen wird der Elektronenstrahl einmal in den Speicherring eingebracht, um dort etwa

acht Stunden zu kreisen. Dabei wird der Strahl schwächer, weil Elektronen verloren gehen, aber keine nachgeliefert werden. Das ist für Forschende unangenehm, denn sie müssen ihre Instrumente für viele Experimente ständig nachjustieren. An der SLS hingegen werden die verlorenen Elektronen alle vier bis fünf Minuten durch neue ersetzt, sodass die Intensität der Röntgenstrahlen kaum variiert.

Neutronen

Neben der Röntgenstrahlung nutzen die Wissenschaftler weitere Methoden, die komplementäre Einblicke ins Material erlauben. Leichte Elemente wie Wasserstoff oder Lithium sind für Röntgenstrahlen praktisch durchsichtig. Nun bestehen aber gerade organische Materialien zu einem grossen Teil aus Wasserstoff und Kohlenstoff. Auch das Lithium in den Lithiumionen-Batterien lässt die Röntgenstrahlen fast ungehindert passieren. Hier behelfen sich die Forschenden mit Neutronen, die auch mit einigen sehr leichten Elementen interagieren. Da sie elektrisch neutral sind, ist für sie die negativ geladene Hülle der Atome durchsichtig. Erst wenn sie auf den kleinen, aber schweren Atomkern treffen, reagieren sie. Neutronen bilden zusammen mit Protonen die Atomkerne. Weil sie nur hier vorkommen, müssen die PSI-Forscher sie über einen Umweg herstellen: Sie beschleunigen den nackten Kern eines Wasserstoffatoms, der nur aus einem einzelnen Proton besteht, und schiessen diesen auf einen Bleiblock. Das Proton kollidiert nun mit dem Kern



Blick in die Neutronenleiterhalle. Mit insgesamt 18 unterschiedlichen und oft weltweit einzigartigen Instrumenten, von denen die meisten den interessierten Nutzern aus aller Welt zur Verfügung stehen, lassen sich am PSI Materialien mit Neutronen untersuchen.



eines Bleiatoms, der aus vielen Protonen und Neutronen besteht. Der Kern beginnt so stark zu vibrieren, dass er mehrere Protonen und Neutronen verliert. Dadurch erhalten die Forschenden Neutronen.

Die Neutronen sind für die Experimente aber noch zu schnell, deshalb befindet sich das Blei in einem Wassertank. Das schwere Wasser (D_2O) und in einem zweiten Schritt flüssiger schwerer Wasserstoff (D_2) bremsen die Neutronen auf eine Geschwindigkeit ab, die für die Experimente geeignet ist. Ähnlich wie die Röntgenstrahlen werden nun die Neutronen auf eine Materialprobe gelenkt. Je nach Materialstruktur der Probe werden die Neutronen abgelenkt und abgebremst. So erhalten die Wissenschaftler Informationen über das Material. Da sich Neutronen wie kleinste Magnete verhalten, können sogar Rückschlüsse auf den Magnetismus im Material getroffen werden.

Myonen

Myonen reagieren gegenüber Neutronen noch empfindlicher auf die Magnetfelder innerhalb einer magnetischen Probe. Sie bleiben im Material stecken und besetzen leere Plätze zwischen den Atomen. Nach einer Millionstelsekunde zerfallen sie und senden ein Teilchen nach aussen, das detektiert werden kann. Nicht nur die Richtung, sondern auch die Stärke des Magnetfelds wird so im Material in einer von der Geschwindigkeit des Myons abhängigen, beliebigen Tiefe gemessen.

Zum Messen müssen Myonen künstlich hergestellt werden, obwohl sie auch natürlich vorkommen: Die energiereiche Strahlung, die von der Sonne auf die Atmosphäre trifft, produziert ständig Myonen, die auch die Erdoberfläche erreichen. Diese natürlichen Myonen können aber nicht eingefangen und genutzt werden, sie zerfallen zu

schnell. Im Labor entstehen Myonen als Zerfallsprodukt nach einer Kollision von Protonen mit Kohlenstoff.

Auch hier sind die Elementarteilchen anfangs zu schnell und müssen abgebremst werden. Eine Spezialität des PSI sind extrem langsame Myonen. Es ist weltweit das einzige Institut, das so langsame Myonen herstellen kann. Sie werden zuerst von einer Silberfolie gebremst und durchqueren dann eine Schicht aus gefrorenem Edelgas, beispielsweise Argon. Dieses wirkt wie die Menschenmenge im Hauptbahnhof während der Stosszeit: Als Passant kann man sich nur von der Masse mittragen lassen, man kann weder schneller noch langsamer laufen. So erhalten die Myonen, die ursprünglich in verschiedenen Geschwindigkeiten unterwegs waren, eine einheitliche Geschwindigkeit, und die Forscher können festlegen, in welche Tiefe die Myonen in die Probe eindringen sollen.

SwissFEL

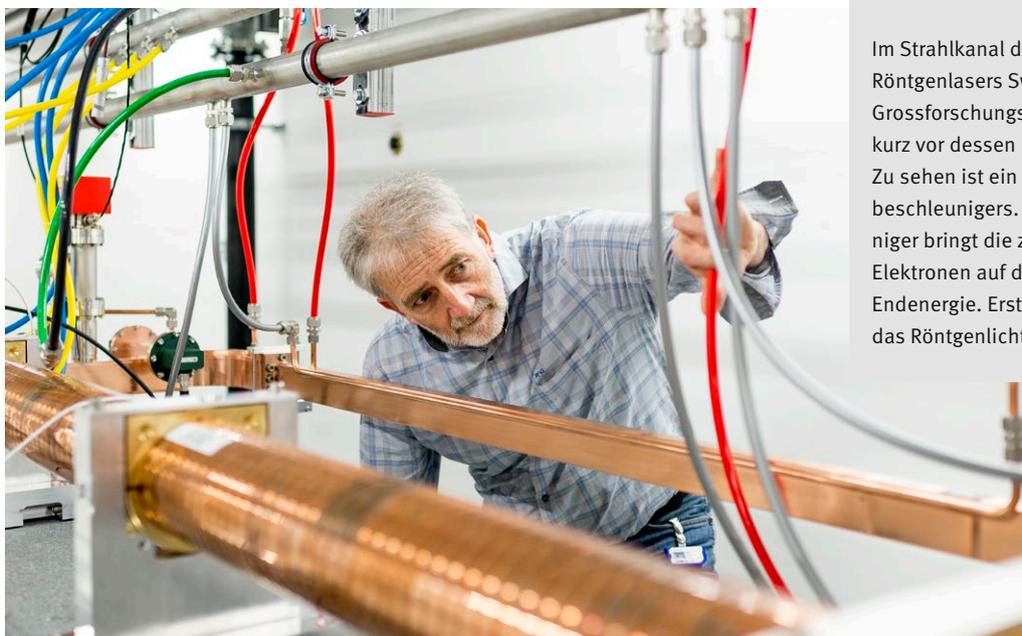
Der Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL ist die jüngste Grossforschungsanlage des PSI.

Mit den Röntgenstrahlen der SLS, den Neutronen der SINQ und den Myonen der μS können die meisten Materialien charakterisiert werden. Es gibt aber Grenzen. Dies gilt insbesondere für einige wichtige Moleküle, die die Funktionsweise biologischer Zellen bestimmen. Kristalle dieser sogenannten Membranproteine lassen sich heute an der SLS bis zu einer Mindestgrösse von ca. einem Hundertstelmillimeter untersuchen. Leider lassen sich von den wenigsten in der Natur und im Menschen vorkommenden Membranproteinen Kristalle in dieser Grösse herstellen. Und es ist gerade dieses Wissen über die Struktur von Membranproteinmolekülen, in das die Pharmaforschung heute grosse Hoffnung setzt, um damit neue Medikamente zu entwickeln.

Zudem können in den drei Grossanlagen SLS, SINQ und μS keine ultraschnellen Vorgänge beobachtet werden, wie sie gerade bei den schnellen Schaltvorgängen der Multiferroika und Spintronik-Materialien oder auch katalytischen chemischen Reaktionen ablaufen. Die «Belichtungszeiten» sind zu lang.

Sowohl das Problem mit den kleinen Proben als auch den ultraschnellen Vorgängen kann mit extrem intensiven und sehr kurzen Röntgenlichtpulsen gelöst werden. Genau diese liefert der Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL, die vierte und jüngste Grossforschungsanlage des PSI. Die für die Herstellung des Röntgenlichts verwendeten Elektronen werden durch einen sehr kurzen Laserpuls aus einem Metallstück geschlagen. Die dabei entstehenden Elektronenpakete werden in einem Linearbeschleuniger auf die erforderliche Endenergie gebracht und über ausgefeilte Tricks so stark kom-

primiert, dass sie sich als «Kollektiv» verhalten. Werden sie nun analog zur SLS über eine Anordnung abwechselnd angeordneter Magnete geschickt, senden sie Röntgenlicht aus. Anders als bei einer Synchrotronlichtquelle erfolgt dies nun aber quasi im «Gleichtakt». Die Röntgenstrahlung ist dadurch im Puls um ein Milliardenfaches stärker als die Strahlung der SLS und verfügt über Eigenschaften, die bewirken, dass selbst kleinste Proben ein scharfes Bild erzeugen. Aufgrund der kurzen Pulse können Momentaufnahmen ultraschneller physikalischer, chemischer oder biologischer Vorgänge aufgenommen werden. Diese können dann zu einem Film zusammengesetzt werden, den die Forscherinnen und Forscher später in Zeitlupe betrachten, um so neue Kenntnisse für die Materialien künftiger Technologien zu gewinnen.



Im Strahlkanal des Freie-Elektronen-Röntgenlasers SwissFEL, der jüngsten Grossforschungsanlage des PSI, kurz vor dessen Inbetriebnahme. Zu sehen ist ein Teil des Linearbeschleunigers. Der Linearbeschleuniger bringt die zuvor erzeugten Elektronen auf die erforderliche Endenergie. Erst dann kann das Röntgenlicht erzeugt werden.

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/Redaktion

Dagmar Baroke
Dr. Thomas Lippert
Thomas Meier
Dr. Paul Piwnicki
Guido Santner
Dr. Thierry Strässle

Fotos

Scanderbeg Sauer Photography
Frank Reiser
Markus Fischer
Roland Keller

Gestaltung und Layout

Monika Blétry

Druck

Paul Scherrer Institut

Zu beziehen bei

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

Villigen PSI, Oktober 2018

Kontakte

Forschungsbereichsleiter

Forschung mit Neutronen und Myonen

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

Forschungsbereichsleiter

Photonenforschung

Prof. Dr. Gabriel Aeppli
Tel. +41 56 310 42 32
gabriel.aeppli@psi.ch

Forschungsbereichsleiter

Nukleare Energie und Sicherheit

Prof. Dr. Andreas Pautz
Tel. +41 56 310 34 97
andreas.pautz@psi.ch

Forschungsbereichsleiter

Energie und Umwelt

Prof. Dr. Thomas J. Schmidt
Tel. +41 56 310 57 65
thomasjustus.schmidt@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

