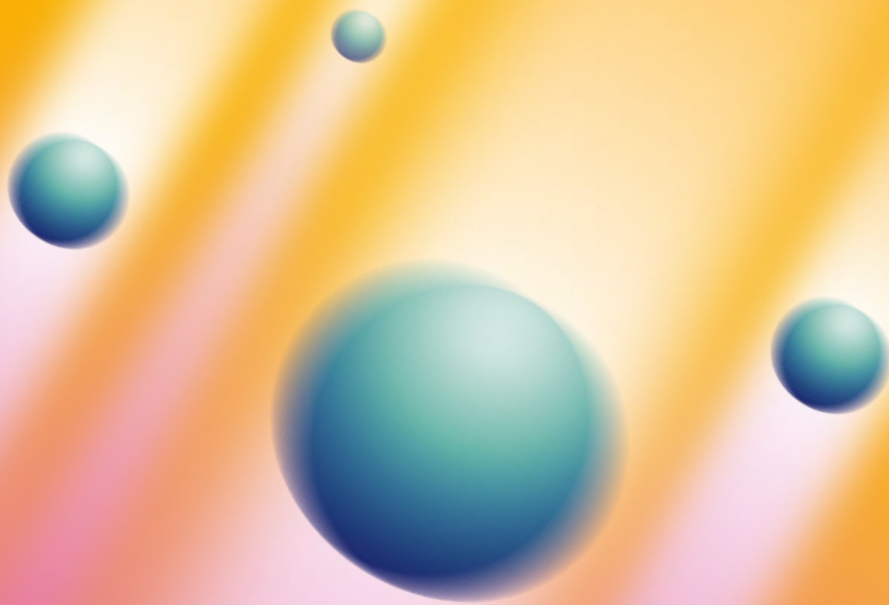


5
2
3
2

#2/2025

Hintergrund
Die Quantenkünstler:
Forschende, die Zukunft
entstehen lassen

Interview
«Die Schweiz muss
in der Quantenforschung
weiter Gas geben»



Das Magazin des Paul Scherrer Instituts PSI

Quanten: filigran und zukunftsweisend

Die Quantenforschung ergründet die Poesie des Kleinsten –
und revolutioniert unsere Welt



Schwerpunktthema

Quanten: filigran und zukunftsweisend

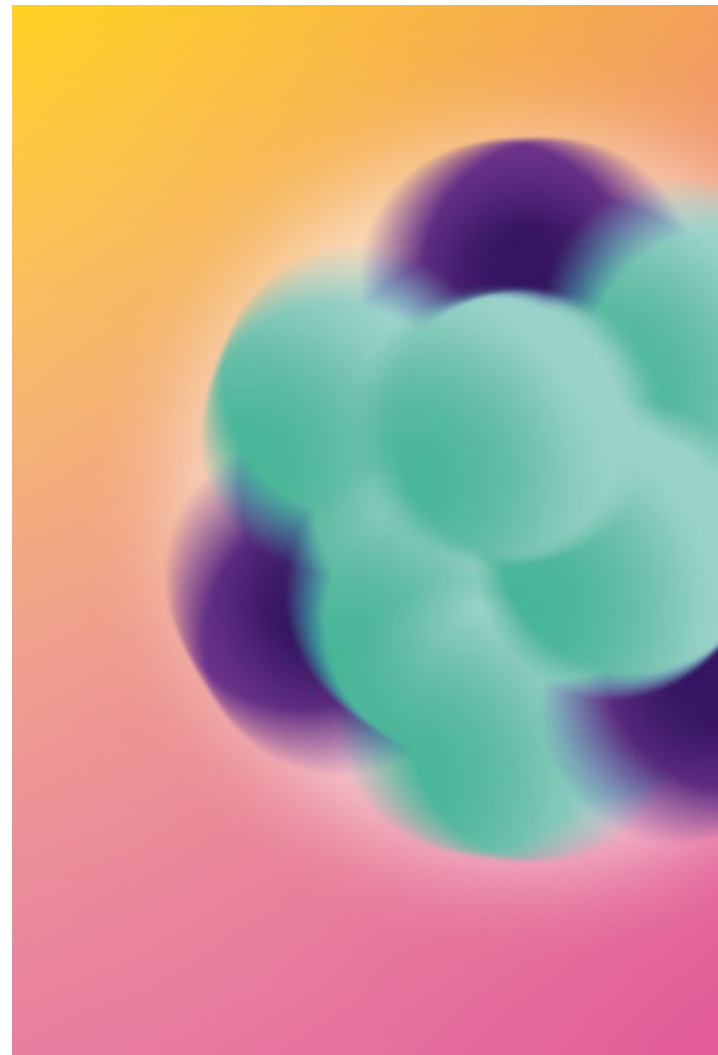
Die Quantenforschung ergründet die Poesie des Kleinsten – und revolutioniert unsere Welt

Hintergrund

Die Quantenkünstler

Atome mit Lichtstrahlen einzufangen oder zwei gegenläufige Schwingungen gleichzeitig zu erzeugen, ist eine besondere Kunst. PSI-Forschende beherrschen sie immer besser.

Seite 8



Interview

«Die Schweiz muss in der Quantenforschung weiter Gas geben»

Heike Riel leitet die Quantenforschung von IBM in Rüschlikon. Im Interview spricht sie über die Bedeutung dieser Wissenschaft und die Rolle der Schweiz.

Seite 17



Editorial

Die Kunst der Quanten 4



Schwerpunktthema

Quanten: filigran und zukunftsweisend 6

Hintergrund

Die Quantenkünstler 8

Interview

«Die Schweiz muss in der Quantenforschung weiter Gas geben» 17

Im Bild

Jenseits von Lithium-Technologien 19

Alltag & Forschung

Vom Eisen zum Rost 20

Von Gasen zu Feinstaub 21

In der Schweiz

Eintausend Module für das CERN 22

Die Teilchendetektoren des CERN benötigen regelmässig Upgrades. Eine Forschungsgruppe am PSI ist an der hochkomplexen Elektronik der Bauteile beteiligt.

In Kürze

Aktuelles aus der PSI-Forschung 26

- 1 Dem Atomkern so nah wie nie
- 2 Genetische Störungen erkennen
- 3 Präzise Strahlkraft gegen Lymphdrüsenkrebs
- 4 KI-Kochbuch für klimafreundlichen Zement

Galerie

Das PSI als Stadt 28

In dieser Galerie stellen wir Ihnen eine Auswahl «städtischer» Einrichtungen und Dienstleistungen am PSI vor.

Lebenswege

Wo Analyse auf Aromen trifft 34

Ein Geochemiker wird Brauer – wie Luc Van Loon mit wissenschaftlicher Präzision preisgekrönte Biere schafft.

Wir über uns

38

Impressum

39

Ausblick

39

Die Kunst der Quanten

Seien Sie unbesorgt: Wenn Sie denken, die Sache mit den Quanten niemals begreifen zu können, sind Sie in bester Gesellschaft. Auch Forschende tun sich mit der Quantenmechanik nicht ganz leicht – obwohl deren Entdeckung nun schon einhundert Jahre zurückliegt: 1925 erschienen bedeutende Fachpublikationen, die bis heute das Fundament dieses Forschungsgebiets bilden. Wir nehmen dieses Jubiläum zum Anlass, Ihnen die Quanten in diesem Magazin nahezubringen.

Interpretieren konnten die damaligen Forschenden vieles nicht – aber sie akzeptierten, dass die Natur sich im Kleinsten ganz anders verhält, als wir es im Alltag erleben. Und: Die Forschenden konnten mit ihren neuen Formeln die Welt der Atome berechnen und zuverlässige Vorhersagen treffen. Vielleicht ist Quantenphysik wie Kunst – die praktische Wirkung ist genauso wichtig wie das Detailverständnis.

Das ein oder andere Rätsel geben die Quantenphänomene bis heute auf; und doch können Forschende sie nutzen. Dafür platzieren sie einzelne Atome mit Lichtpinzetten so exakt, dass die berechneten Effekte eintreten; oder sie verformen ein Material aus dünnsten Schichten so, dass die Quantennatur höchst nützliche Eigenschaften hervorbringt. Wie dies zu Produkten geführt hat, die schon heute im Einsatz sind und was in Zukunft noch kommen könnte, davon berichten wir in dieser Ausgabe.

Denn unser Institut mag noch nicht in erster Linie für seine Quantenforschung berühmt sein, und doch spielt sie in sehr vielen Bereichen der PSI-Forschung eine Rolle. Je detaillierter die Forschenden hinschauen – sei es in Materialien für künftige Technologien oder in wichtige Moleküle im menschlichen Organismus –, umso stärker treten Quanteneffekte zum Vorschein.

Daher haben wir auf dem PSI-Campus neben dem ETH-PSI Quantum Computing Hub nun ein eigenes Gebäude der fundamentalen Quantenforschung an Materialien gewidmet. Sie sehen mich hier in der fast fertigen und noch leeren Laborhalle des neuen QMMC: dem Quantum Matter and Materials Center. Hier werden viele Forschungsgruppen, die bisher über das Gelände des PSI verstreut waren, besser als zuvor zusammenarbeiten können und neue Instrumente gemeinsam entwickeln und nutzen.

Und falls die Welt des Kleinsten Sie weniger beeindruckt, werfen Sie mit uns einen Blick auf eine der grössten Maschinen der Welt: den Teilchenbeschleuniger am CERN. Wie eine PSI-Forschungsgruppe hilft, das dortige nächste Upgrade vorzubereiten, lesen Sie ab Seite 22.

Zum Schluss gönnen wir Ihnen ein Bier – zumindest auf Papier. Der ehemalige PSI-Forscher Luc Van Loon betreibt eine kleine, sehr feine Brauerei. Unser Autor hat sich die Chance auf einen Besuch nicht entgehen lassen. Hätte ich auch nicht.

Ihr Christian Rüegg, PSI-Direktor





Quanten: filigran und zukunftsweisend

Die Quantenwelt ist mysteriös. Doch Forschende verstehen ihre kuriosen Regeln immer besser. Und nutzen sie für Technologien, die unser Leben verändern werden.

Text: Bernd Müller

1

Hintergrund

Die Quantenkünstler

Kapitel 1:
Zeitbremse und Ionenfallen

Kapitel 2:
Duett des Terbiiums und andere Quantenkunst

Kapitel 3:
Atome unter Druck

Seite 8

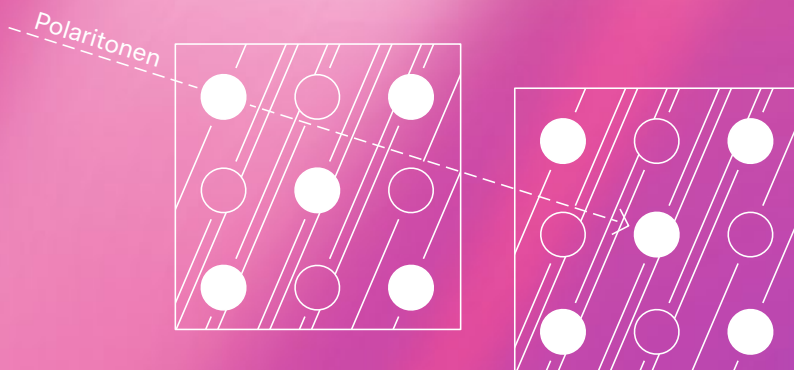
2

Interview

«Die Schweiz muss
in der Quantenforschung
weiter Gas geben»

Seite 17





Computer ohne Kabel

Mit Laserstrahlen lassen sich einzelne Atome einfangen und exakt positionieren (grosses Bild). Wechao Xu platziert so verschiedene Sorten von Atomen in einer Ultrahochvakuumkammer und nutzt die Atome als Qubits. Bei zunehmender Qubit-Zahl müssen auch weit voneinander entfernte Atome miteinander in Verbindung gebracht werden. Hier kommen Polaritonen ins Spiel. Diese Quasiteilchen haben sowohl Eigenschaften von Licht als auch von Materie. Das macht sie zu idealen Postboten zur Übertragung von Quantennachrichten über grosse Distanzen. Wenchao Xu möchte damit einzelne weit auseinanderliegende Atome verbinden, um modulare Quantenberechnungen zu ermöglichen.

Die Quantenkünstler

Forschende am PSI stellen unsere Alltagserfahrung auf die Probe: Sie kreieren neue Materialien, erschaffen Mosaik aus exakt platzierten Atomen, lassen Strom ohne Widerstand fließen – und verlangsamen in Simulationen die Zeit. Einblicke in die Labore, in denen die Zukunft entsteht.

Kapitel 1: Zeitbremse und Ionenfallen

Cornelius Hempel berechnet Quantenphänomene mit Quanten. Klingt logisch, ist aber hochkomplex. Sein neuester Coup: ein Quantensimulator, der die Zeit verlangsamt.

Wie schön wäre es, wenn man die Zeit bremsen könnte. Beim Blick in den Spiegel käme nicht jeden Morgen eine neue Falte dazu; und der schöne Urlaub liesse sich etwas verlängern. Cornelius Hempel hat relativ wenige Falten im Gesicht. Das liegt wohl daran, dass der Physiker vom Zentrum für Photonenforschung 44 Jahre jung ist; und nicht an der Maschine, die sein Team in einem fensterlosen Labor aufgebaut hat – ein scheinbar chaotischer Wirrwarr aus Kabeln, Linsen und Lasern. Und doch: Sie verlangsamt die Zeit – zumindest in komplexen Berechnungen. Es ist ein Quantencomputer auf Basis einer Ionenfalle und Hempel nutzt ihn, um ultraschnelle chemische Reaktionen in Zeitlupe zu simulieren. Falten im Gesicht verhindert er damit nicht.

Eigentlich sei sein Quantensimulator eine Atomuhr, betont Cornelius Hempel. Beide arbeiten mit Ionen, also elektrisch geladenen Atomen, die in einer Falle gefangen und deren Elektronen mithilfe von Lasern zum Schwingen gebracht werden, ähnlich wie das Pendel einer alten Uhr. Die ersten Atomuhren wurden in den 1950er-Jahren gebaut und mit Mikrowellen betrieben. Sie bilden weiterhin die Grundlage unserer Zeitmessung und definieren mit ihrer Schwingung die Sekunde – rund 9,1 Millionen Schwingungen entsprechen einer Sekunde. Dies schaffen sie mit einer Genauigkeit von 16 Nachkommastellen, sodass sie in 100 Millionen Jahren etwa eine Sekunde falsch gehen. Heutige Modelle auf Ionenbasis sind tausendmal genauer. «Nichts anderes kann man genauer messen als die Zeit», so Hempel.

Hempel nutzt die Atomuhr als sogenannten Quantensimulator. Das ist ein Quantensystem, das ein anderes Quantensystem – häufig einen Festkörper oder eine Flüssigkeit – kontrollierbar nachbildet. Das Verhalten von Quanten berechne man am besten mit Quantencomputern – das hatte Physiknobelpreisträger Richard Feynman schon 1982 vorgeschlagen.

Lange lag Feynmans Konzept in der Schublade. Erst in den 1990er-Jahren wurde die Idee weiterverfolgt, bis dann 1995 der erste Prototyp eines Quantencomputers auf Basis einer Atomuhr mit Ionen gezeigt wurde.

Atomkerne mit natürlicher Vibration

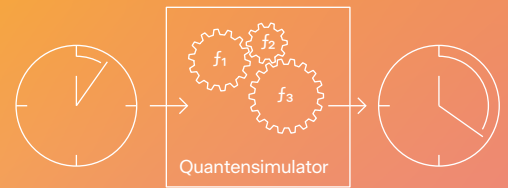
In den letzten zehn Jahren haben Quantencomputer so grosse Fortschritte gemacht, dass sie sich nun bestens als Quantensimulatoren eignen. Damit bekommen Physiker ein neues und leistungsfähiges Werkzeug an die Hand, mit dem sich das Verhalten von Molekülen, also Gruppen von verschiedenen Atomen, bis in die quantenphysikalischen Details berechnen lässt. Selbst die schnellsten Supercomputer müssen hier oft passen. Damit Forschende mit diesen immerhin ein halbwegs sinnvolles Ergebnis erhalten, tun sie bisher so, als wären die Atomkerne wie eingefroren; der Supercomputer berechnet dann nur, wie sich die Elektronen um die Kerne bewegen. Doch das ist realitätsfern. «Die Atomkerne vibrieren und das sollten sie auch in der Simulation tun», sagt Hempel. Ein Quantensimulator mit Ionen ist hierfür vielversprechend, da diese ganz natürlich in ihrer Falle vibrieren.

Der Nachteil eines Quantensimulators: Er erreicht nicht das ultraschnelle Tempo der Phänomene in der Welt der Moleküle und Atome. Seine Geschwindigkeit entspricht nur der des zugrunde liegenden Quantensystems. Hier kommt die «Zeitbremse» ins Spiel. Sie nutzt ein mathematisches Modell, das mit dem zu simulierenden System übereinstimmt, um das Verhalten der Ionen im Experiment zu beschreiben – jedoch mit einem Zeitstreckungsfaktor von 100 Milliarden. Tatsächlich verlangsamt Hempel so nicht das Quantensystem selbst, sondern nur sein Abbild im mathematischen Modell.

Blitzschnelle Information im Auge

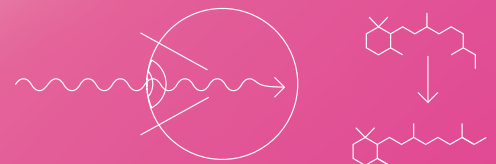
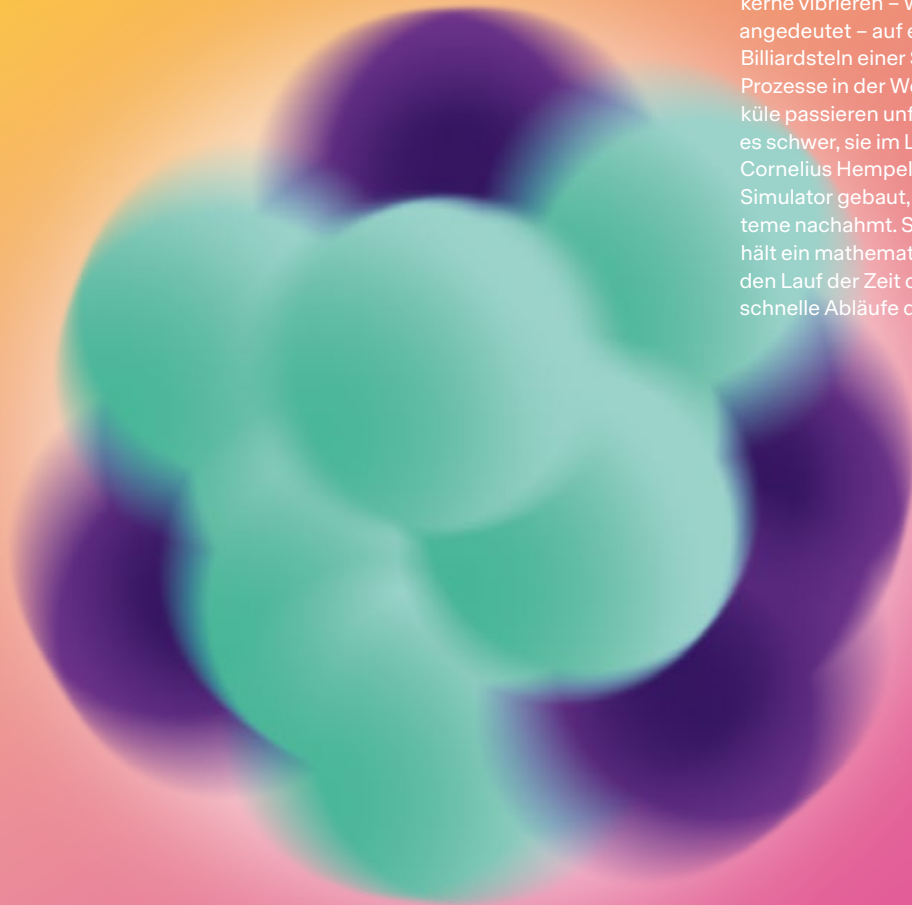
Ultraschnelle chemische Reaktionen treten an den verschiedensten Stellen in der Natur auf. Sie verhindern, dass wir ständig Sonnenbrand bekommen, indem im Erbgut der Zellen einfallendes UV-Licht in Wärme umgewandelt wird, bevor Schäden entstehen.





Zeitbremse

Extrem klein und unglaublich schnell: Atomkerne vibrieren – wie hier im grossen Bild angedeutet – auf einer Zeitskala von zehn Billiardstel einer Sekunde. Auch viele weitere Prozesse in der Welt der Atome und Moleküle passieren unfassbar schnell. Das macht es schwer, sie im Labor zu beobachten. Cornelius Hempel weiss Abhilfe: Er hat einen Simulator gebaut, der andere Quantensysteme nachahmt. Sein Quantensimulator enthält ein mathematisches «Getriebe», das den Lauf der Zeit dehnt. So kann Hempel blitzschnelle Abläufe quasi in Zeitlupe studieren.



Rasantes Retinal

Das Molekül Retinal sitzt in der Netzhaut im Auge. Wenn Licht darauf trifft, ändert es seine Form und es wird ein Signal ans Gehirn gesendet. Das dauert nur knapp ein halbes Billionstel einer Sekunde. Mit seinem Quantensimulator ahmt Cornelius Hempel den Prozess nach. Die hochgenaue Zeitauflösung, die er damit erreicht, ergänzt die experimentellen Untersuchungen anderer PSI-Forschenden.

Auch in der Netzhaut unserer Augen spielen sich sehr schnelle chemische Reaktionen ab. Das Molekül Retinal übersetzt einfallendes Licht in Information, die der Sehnerv dann ans Gehirn leitet. Trifft ein Lichtteilchen – ein sogenanntes Photon – auf, reckt sich das gekrümmte Molekül blitzschnell in die Länge, wodurch der Sehnerv angeregt wird. Am Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL untersuchen andere PSI-Forschungsgruppen diesen Prozess experimentell. Das Retinal schaltet innerhalb von nur rund 400 Femtosekunden, also knapp ein halbes Billionstel einer Sekunde. In Hempels Quantensimulator läuft die Berechnung dagegen in gemütlichen Millisekunden ab. Das hat den Vorteil, dass der Forscher genau studieren kann, was bei der Verformung des Moleküls passiert und wie die Atome zusammenarbeiten.

Ein Quantensimulator arbeitet meist analog; ein Quantencomputer dagegen digital. Die Qubits des Quantencomputers kennen die binären Zustände 0 und 1, mit denen klassische Computer arbeiten – mit einem Unterschied: Qubits können beide Zustände gleichzeitig in unterschiedlichen Anteilen einnehmen. Das potenziert ihre Rechenleistung für bestimmte Aufgaben ins Unermessliche.

Digitales Futter für analoge Quantencomputer

Was wäre, wenn man Quantensimulator und -computer kombinieren könnte, also den analogen und den digitalen Modus? Das ergäbe einen Quantensimulator, den man mit digitalen Informationen füttern könnte. Das Beste aus beiden Welten haben Andreas Elben und Andreas Läuchli vom Zentrum

für Computergestützte Wissenschaften, Theorie und Daten des PSI in einer bahnbrechenden Veröffentlichung in *Nature*, einem der renommiertesten wissenschaftlichen Fachmagazine, vereint. Sie haben zusammen mit Forschenden von Google und Universitäten in fünf Ländern gezeigt, wie man mit nur 69 Qubits eines Quantencomputers von Google quantendynamische Prozesse wie die Wärmeausbreitung in einer Flüssigkeit berechnen kann, etwa wenn man in einer chemischen Reaktion zwei Stoffe mit unterschiedlicher Temperatur mischt.

Das Konzept ebnet den Weg zum universellen Quantensimulator und soll in den verschiedensten Teilgebieten der Physik zum Einsatz kommen. Auch die Ionenfallen von Cornelius Hempel eignen sich für einen universellen Quantensimulator.

Träge Spatzen auf der Stromleitung

Hempel hat einige Dutzend Ionen in einer Kammer angeordnet. Sie sitzen wie Spatzen auf einer Stromleitung. Er muss sie von aussen mit Laserlicht zum Rechnen animieren – kein Problem bei dieser Anzahl. Möchte man zukünftig jedoch Millionen Qubits auf einem Chip haben, müssen die Laser auf dem Chip integriert werden und sich einzeln an- und ausschalten lassen – integrierte Photonik heisst das Stichwort. Das gibt es heute schon in Datenzentren, doch diese integrierten Laser sind erstens zu gross und leuchten zweitens mit Wellenlängen im tiefen Infrarotbereich; Quantencomputer brauchen sichtbares Licht. «Deshalb entwickeln wir diese Technologien am PSI selbst», sagt Cornelius Hempel. Vielleicht entstehen daraus eines Tages Hybridprozessoren, auf denen Atome und Laser eines Quantencomputers mit herkömmlicher Siliziumelektronik vereint sind.

Noch sind diese Technologien ein Stück entfernt von einer kommerziellen Anwendung. Es gibt weitere Gruppen am PSI, die daran arbeiten, diese Lücke zu schliessen; darunter Kirsten Moselund und ihr Team im Labor für Nano- und Quanten-Technologien am Zentrum für Photonenforschung des PSI.

Und schon heute profitieren viele Industrien von den Entwicklungen, die rund um Quantencomputer entstehen, etwa Elektronik, Messtechnik oder Photonik. «Sehr viel Forschung am PSI beschäftigt sich mit Phänomenen, die wir sehr gerne bis auf die Ebene der Quantenphysik verstehen würden», betont Cornelius Hempel. «Und Quantenphänomene stecken in vielen aktuellen und künftigen Produkten, zu denen unsere Arbeit dann einen entscheidenden Beitrag leisten kann.»



«Quantenphänomene stecken in vielen aktuellen und künftigen Produkten, zu denen unsere Arbeit beitragen kann.»

Cornelius Hempel, Forscher am Zentrum für Photonenforschung des PSI

Kapitel 2: Duett des Terbioms und andere Quantenkunst

Um stabilere Qubits zu schaffen, lassen PSI-Forschende Terbiumionen paarweise auftreten. Anderswo platzieren sie mit Lichtpinzetten Atome hochgenau.

«Die Guten ins Töpfchen und die Schlechten ins Kröpfchen», heisst es im Märchen von Aschenputtel. Auch wenn es um Quantencomputer geht, muss das Gute vom Schlechten getrennt werden – auf Ebene der Atome und ihrer elektrisch geladenen Geschwister, den Ionen. Das «Gute», das sind für Forschende die Qubits, zum Beispiel Atome oder Ionen, die in einem Quantencomputer die Berechnungen ausführen können. Qubits sind für gewöhnlich sehr empfindlich; jede noch so kleine mechanische oder magnetische Störung von aussen lässt die sogenannte Kohärenz in Sekundenbruchteilen zusammenbrechen, dann werden die Qubits aus ihrem Takt geworfen und die Quanteninformation geht verloren. Sie werden zu «schlechten» Qubits und sind für Berechnungen eines Quantencomputers hinderlich.

In aktuellen Quantencomputern sind Qubits relativ weit voneinander entfernt, sodass sie sich nicht gegenseitig stören. Was bei 50 oder 100 Qubits noch gut funktioniert, wird zum Problem, wenn man für zukünftige Quantencomputer an viele Millionen Qubits denkt – und diese ähnlich wie die Bits auf heutigen Computerchips sehr dicht zusammenpacken möchte. Dann stören sie sich gegenseitig und aus «gut» wird «schlecht».

Simon Gerber und Gabriel Aeppli vom Zentrum für Photonenforschung am PSI kennen einen Weg, um auch dicht gepackte Qubits deutlich länger im Töpfchen der «Guten» zu behalten. Ihre Terbiumionen-Qubits sind in die atomare Gitterstruktur von Kristallen aus Yttrium-Lithium-Fluorid eingebunden. Dabei tut sich Erstaunliches: Die Terbiumionen erzeugen stabilere Qubits als erwartet, also mit viel höherer Kohärenz.

«Der Trick besteht darin, dass die Qubit-Zustände nun nicht wie üblich in einzelnen Ionen gespeichert werden, sondern im Zusammenwirken von je zwei Ionen», erklärt Gerber. «Diese Ionenpaare entstehen ganz natürlich, wenn man viel Terbium in den Kristall gibt.» Der Vorteil: Ionenpaar-Qubits kommunizieren mit einer ganz bestimmten Frequenz, die von einzelnen Terbiumionen oder anderen Atomen im Kristall nicht gestört werden kann. Es ist, als nutze man im Radio eine neue Frequenz weit weg der bisherigen Sender: Die alten Frequenzen funken ihr nicht hinein. Auf die Qubits übertragen bedeutet das: Man kann ungehindert mit ihnen kommunizieren und ihre



Wenchao Xu, Forscherin am Zentrum für Photonenforschung des PSI, positioniert Atome mit Laserstrahlen. Mit der Methode der «optischen Pinzetten» will sie bis zu 5000 Atome hochgenau anordnen.

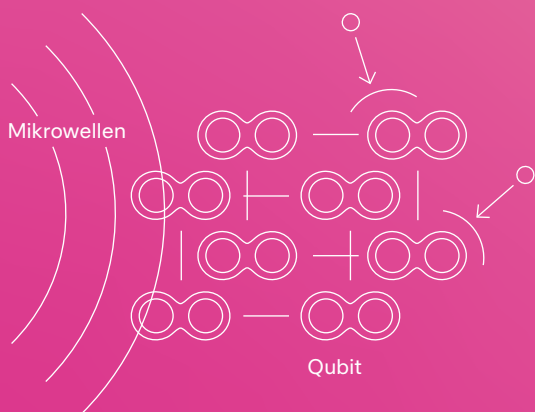
Kohärenz bleibt um ein Vielfaches länger erhalten. Das macht den PSI-Ansatz für den Bau von zukünftigen Quantencomputern hochinteressant.

Schutzschild aus Mikrowellen

Es geht aber noch besser. Denn auch externe magnetische Störungen bedrohen die Terbiumionen-Qubits. Bestrahlt man sie jedoch mit Mikrowellen, wirkt das wie ein Schutzschild dagegen. Die Paar-Qubits haben dann eine bis zu hundert Mal längere Lebensdauer als Qubits aus einzelnen, nicht bestrahlten Ionen. «Mit dem richtigen Material könnte die Kohärenz sogar noch länger sein», vermutet Gabriel Aeppli, Leiter des Zentrums für Photonenforschung am PSI. Mit dem Wissen über dieses Phänomen möchte das Team nun den Aufbau weiter optimieren.

Die Experimente, die letztes Jahr in der Fachzeitschrift *Nature Physics* veröffentlicht wurden, eröffnen einen interessanten neuen Weg für den Bau von Quantencomputern. Dafür wird es allerdings nicht reichen, einfach Terbiumionen in ein Kristallgitter zu streuen. «Der Trend geht zum quasi chirurgischen Platzieren von Atomen oder Ionen», sagt Aeppli.

Mit der Anordnung einzelner Atome kennt Wenchao Xu sich aus. Auch sie ist Wissenschaftlerin am Zentrum für Photonenforschung am PSI. Ihre Atome befinden sich allerdings nicht in einem Feststoff, sondern schweben im Vakuum in einer kompakten Kammer. Xu möchte darin bis zu 5000 Atome hochgenau positionieren – mithilfe einer Anordnung fokussierter Laserstrahlen. «Wir nennen diese Technik eine optische Pinzette. Wir können mit je einem Laserstrahl ein einzelnes Atom einfangen



Schutzschild für Qubits

Die grösste Hürde auf dem Weg zum Quantencomputer: Qubits, die beispielsweise aus Atomen oder Ionen bestehen, sind sehr empfindlich und geraten bei der leisesten Störung aus ihrem Quantentakt. Manche Ionen können aber paarweise vorliegen, was sie resistenter macht. Bestrahlt man sie zudem mit Mikrowellen, werden sie nochmals robuster. Simon Gerbers Team untersucht diese vielversprechenden Qubits.

und platzieren», erklärt Xu. Ihr Team nutzt die einzelnen Atome als Qubits und baut aus vielen so platzierten Atomen Quantenprozessoren.

Mischwesen aus Licht und Materie

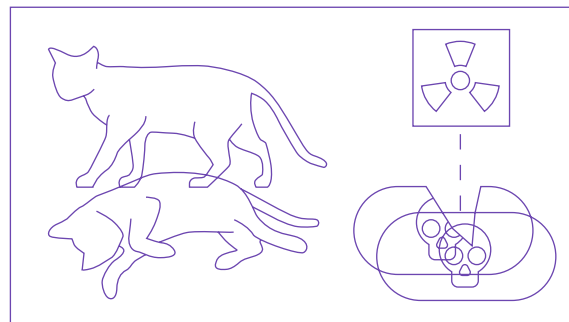
Xu erforscht ausserdem Verbindungsmöglichkeiten zwischen Quantensystemen. Dazu nutzt sie sogenannte Polaritonen. Dies sind Quasiteilchen, die Eigenschaften von Licht und Materie zugleich tragen. Sie könnten als Schnittstelle zwischen atomaren Qubits und Licht dienen, um Quanteninformationen über weitere Entfernungen zu tragen. So liessen sich mit Polaritonen mehrere Quantenprozessoren miteinander verbinden, um grössere Quantencomputer zu ermöglichen.

Auch Dominik Sidler ist an Polaritonen interessiert. Der theoretische Physiker vom Zentrum für Computergestützte Wissenschaften, Theorie und Daten des PSI studiert die Quasiteilchen nicht im Labor, sondern in Computersimulationen. Dort untersucht er die starke Kopplung von Licht mit Materie. Sperrt man Moleküle in ein winziges Spiegelkabinett und lässt darin Licht hin- und herlaufen, kann das Licht die Struktur des Moleküls und damit auch seine chemischen Eigenschaften ändern. Das Besondere daran: Es ist kein Licht von aussen notwendig. Der Quanteneffekt entsteht auch bei absoluter Dunkelheit. Warum sich dadurch die chemischen Eigenschaften ändern? Das ist noch weitgehend unbekannt, denn eigentlich lassen heutige physikalische Modelle dies gar nicht zu. Auch hier könnten Polaritonen die Hand im Spiel haben.

Sidler versucht, dem Geheimnis der polaritonischen Chemie auf die Spur zu kommen. Bei Erfolg winken unter anderem Medikamente, bei denen der gewünschte Wirkstoff energieeffizienter hergestellt wird, weil man in den Lichtfallen die chemische Struktur gezielt modifizieren kann.

Katzen-Qubits

Während Forschende wie Simon Gerber oder Wenchao Xu für ihre Qubits das nehmen, was ihnen die Natur als kleinste Bausteine bietet – Atome und Ionen – geht Alexander Grimm einen anderen Weg: Er stellt Qubits künstlich her. Dazu verwendet er sogenannte Mikrowellenresonatoren, in denen ein elektrisches Signal wie ein Pendel hin und her schwingen kann. Grimms Forschungsgruppe ist in der Lage, den Schwingungszustand in diesen Resonatoren präzise zu kontrollieren. Mehr noch: Bei minus 273 Grad Celsius kann Grimm eine quantenmechanische Überlagerung erzeugen – zwei gegenläufige Schwingungen liegen dann gleichzeitig vor. Es ist,



Schrödingers Katze

In diesem Gedankenexperiment aus dem Jahr 1935 ist eine fiktive Katze in einer Kiste eingesperrt – zusammen mit einer tödlichen Giftkapsel. Mit genau 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit wird das Gift durch einen atomaren Vorgang freigesetzt. Laut der Quantenmechanik liegen beide atomaren Zustände gleichzeitig vor, solange das Ergebnis nicht gemessen wird. Der Physiker Erwin Schrödinger stellte die Frage, ob demnach auch die Katze zugleich tot und lebendig sei. Dies widerspricht unserer Alltagserfahrung, in der wir vor allem klassische Physik beobachten. Es widerlegt aber nicht die Quantenphysik.

als würde ein klassisches Pendel zugleich in zwei entgegengesetzte Richtungen schwingen. «Damit erschaffen wir im Labor so etwas wie Schrödingers Katze», sagt Grimm mit Blick auf Erwin Schrödingers berühmtes Gedankenexperiment. Der Vorteil dieser Katzen-Qubits: Die beiden entgegengesetzten Zustände sind standhaft gegen Störungen, Grimms Qubits bleiben also von Natur aus länger in Aschenputtels «gutem» Töpfchen.

Der ideale Ort für Quantenforschung

Die vielen verschiedenen Ansätze der Quantenforschung gelingen vor allem dann, wenn Forschende aus unterschiedlichen Bereichen zusammenarbeiten. «Jede Disziplin hat ihre Sprache, ihre Formalismen. Wichtig ist deshalb, dass wir über unsere eigenen Fachgrenzen hinausgehen und so neue Möglichkeiten erschliessen», sagt Dominik Sidler. «Das PSI ist dafür der ideale Ort – auch dank der engen Kooperation mit den Hochschulen des ETH-Bereichs und den vielen Kontakten zu international führenden Institutionen.»

«Wir befruchten uns gegenseitig», pflichtet Simon Gerber bei. Das Experiment mit den Paaren aus Terbiumionen beispielsweise könnte auch zu neuartigen Sensoren führen. Grundsätzlich gilt: Um zu verstehen, was sich auf atomarer und elektronischer Ebene abspielt, brauche es grosse «Mikroskope». «Die Grossforschungsanlagen am PSI sind weltweit einzigartig und helfen uns, Materialeigenschaften zu verstehen und damit eine Vielzahl von neuen Anwendungsmöglichkeiten zu eröffnen», sagt Gerber.

Kapitel 3: Atome unter Druck

Zurab Guguchia setzt Materie zu – und erzeugt damit spannende Quantenphänomene, darunter Supraleitung bei leichter erreichbaren Temperaturen.

Materialwissenschaftler sind nicht gerade zimperlich. Sie spannen Materialien ein und drücken oder ziehen mit grosser Kraft, bis die Proben brechen oder zerspringen. In Zurab Guguchias Labor geht es nicht ganz so grob zu. Der Physiker am Zentrum für Neutronen- und Myonenforschung des PSI versucht nicht, etwas zu zerstören, sondern etwas Neues zu schaffen. Zum Beispiel exotische Substanzen, die Strom vollständig verlustfrei leiten, selbst bei hohen Temperaturen, oder die neuartige magnetische und elektronische Eigenschaften zeigen. Wenn seine Experimente erfolgreich sind, könnten sie nicht nur neue Erkenntnisse in der Quantenphysik liefern, sondern auch Türen zu praktischen Anwendungen öffnen – etwa zu energieeffizienten Stromnetzen oder Elektromotoren, die keine Seltene-Erden-Magnete benötigen. Diese Metalle sind nicht wirklich selten, ihr Abbau ist allerdings aufwendig und teuer.

Die Probe, die Guguchia gerade im Labor für Myonspin-Spektroskopie untersucht, ist für Laborbesucher nicht sichtbar. Das kleine Metallfragment ist in einem Röhrchen verborgen, eingetaucht in eine ölige Flüssigkeit, die sanften, allseitigen Druck ausübt.



«Mein Hauptinteresse gilt dem Verständnis der grundlegenden Mechanismen hinter ungewöhnlichen Quantenphänomenen.»

Zurab Guguchia, Forscher am Zentrum für Neutronen- und Myonenforschung des PSI

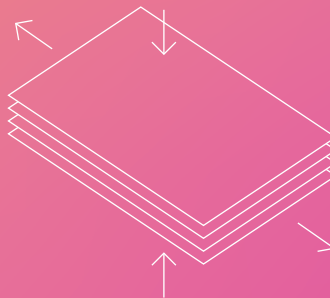
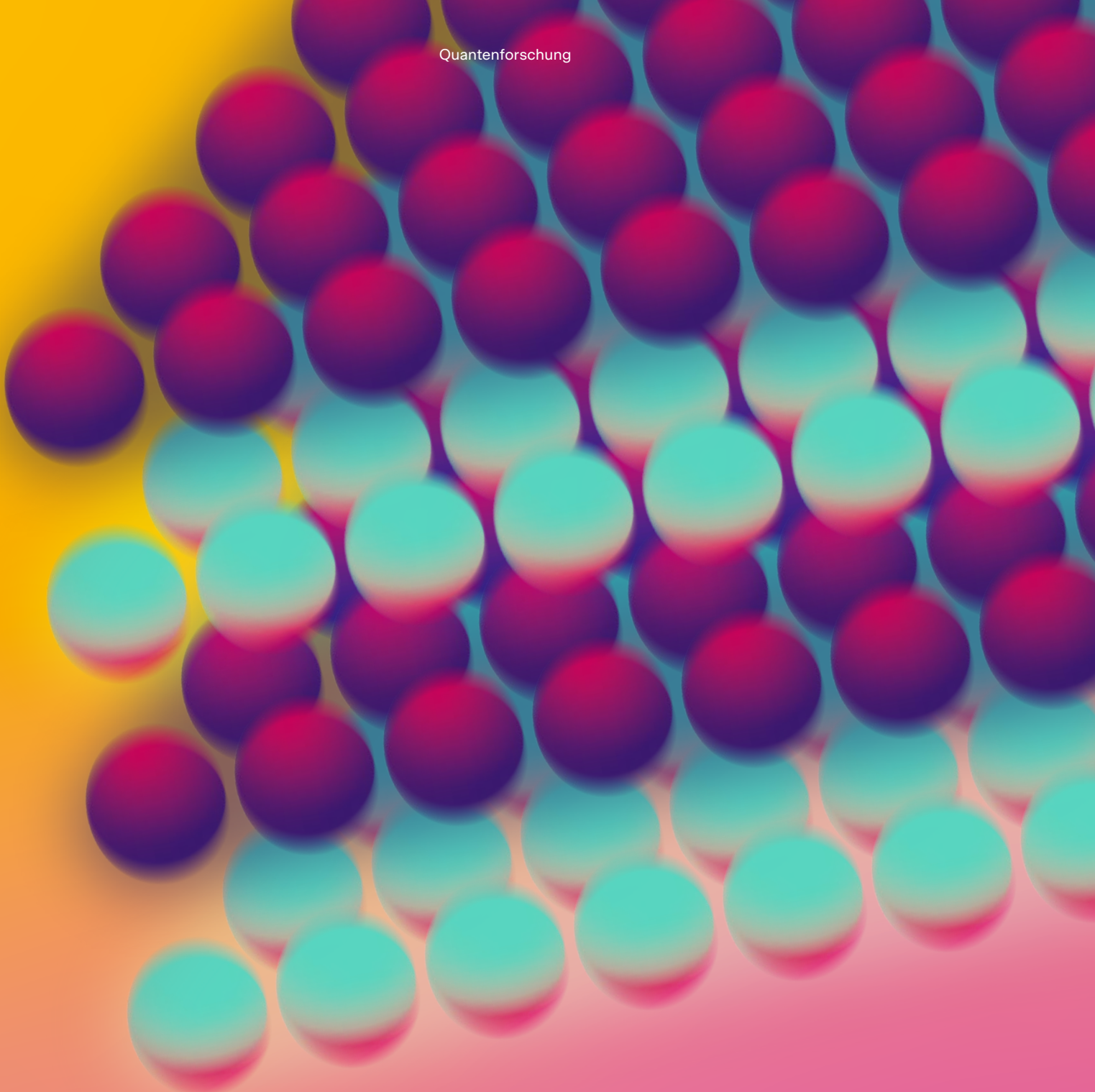
Während dieser hydrostatische Druck allmählich steigt, zeigen die Messgeräte überraschende Werte an. Plötzlich setzt Supraleitung ein: Elektrischer Strom fliesst ohne Widerstand – ausgelöst allein durch den Druck und ohne dass man die Probe extrem abkühlen müsste, wie es normalerweise bei Supraleitung Voraussetzung ist.

Guguchia entdeckt fast jede Woche faszinierende Effekte in seinen Daten. Er publiziert regelmässig in renommierten wissenschaftlichen Zeitschriften, darunter 2022 einen Aufsatz in *Nature* – eine Auszeichnung für jeden Forscher. Im Gespräch deutet er an, dass bereits weitere Publikationen in Arbeit seien.

In seiner neuesten Studie geht es um ein Material mit einer geschichteten Struktur, ähnlich wie Blätterteig, wobei jede Schicht nur ein Atom dick ist. Wenn man die Probe auf die Labortheke legt, passiert nichts. Doch wenn man sie in einen beweglichen Rahmen einspannt und sanft zieht, dehnen sich die Schichten und rücken näher zusammen – ganz wie Teig beim Ausrollen. Oder man gibt die Probe in das ölgefüllte Röhrchen, dann wirkt der hydrostatische Druck gleichmässig von allen Seiten. Wenn alle Parameter stimmen, passiert etwas Magisches: Elektronen – negativ geladene Teilchen, die Atomkerne umkreisen – beginnen, die Elektronen in benachbarten Schichten zu spüren. Dadurch entstehen sogenannte Quantenphasen: Das Material verliert seinen elektrischen Widerstand und wird supraleitend, es wird magnetisch oder es entwickelt eine sogenannte Ladungsordnung, wo sich Ladungsträger in regelmässigen Mustern anordnen. In Quantenmaterialien koexistieren diese drei Ordnungen oft und interagieren auf komplexe Weise.

Widerstreit der Quantenphasen

Die Physikerinnen und Physiker kennen viele verschiedene solcher Quantenphasen, die unterschiedliche Arten der Elektronenwechselwirkung hervorbringen. Wenn die Probe gedehnt oder gestaucht wird, kann sie auch Eigenschaften zeigen, die den erwarteten Ergebnissen widersprechen. Deshalb passt Guguchia die Kräfte in der Druck- oder Zugvorrichtung präzise an, um unerwünschte Phasen zu unterdrücken und erwünschte wie Supraleitung zu verstärken. Nur wenn die atomaren Schichten in eine ganz bestimmte Richtung verzerrt werden, tritt der erwünschte Effekt auf. Guguchia hat zum Beispiel entdeckt, dass eine Zugkraft die Supraleitungstemperatur in Cupraten – nobelpreisgekrönte Hochtemperatur-Supraleiter – um das Fünffache erhöht. Die Ergebnisse unterstreichen, welches Potenzial in dieser mechanischen Verzerrung liegt. Die Arbeit wurde in zwei hoch angesehenen Fachzeitschriften veröffentlicht.



Unter Zugzwang

Manche Materialien sind wie Blätterteig aufgebaut – mit hauchdünnen Schichten, die nur aus einzelnen Lagen von Atomen bestehen. Presst man diese Schichten zusammen oder zieht man daran, entwickeln die Stoffe erstaunliche Eigenschaften: Strom fließt ohne Widerstand; oder das Material wird magnetisch. Zurab Guguchia untersucht in seinen Experimenten Werkstoffe, deren Eigenschaften sich durch äussere Kräfte gezielt verändern lassen.

Guguchias Vision: ein Material, das durch äussere Kräfte in verschiedene gewünschte Phasen geschaltet werden kann – oder sie sogar kontinuierlich moduliert. Das könnte eine Art Schalter sein, der von null Widerstand (supraleitend) zum normalen Widerstand eines Metalls wechselt. In Kombination mit anderen Materialien sind Produkte mit neuartigen technischen Eigenschaften denkbar – etwa Elektromotoren, die eben keine Seltene-Erden-Magnete benötigen.

Atomare Bambuskörbe

Guguchia führt seine Experimente mit hydrostatischem Druck und gerichtetem Zug weiter. In der wissenschaftlichen Gemeinschaft ist er jedoch weltweit für eine andere grosse Entdeckung bekannt – eine, die ihm Einladungen zu führenden internationalen Konferenzen eingebracht hat: Kagome. Eine Bildersuche im Internet zeigt unter diesem Begriff traditionell geflochtene Körbe aus Bambus in Japan. In der Quantenwelt gibt es atomare Gitter, die dieses Muster nachbilden: Sechsecke, umgeben von Dreiecken an jeder Kante, die wiederum mit anderen Sechsecken verbunden sind – in einer sich endlos wiederholenden Struktur.

Wissenschaftler vermuten schon lange, dass flache, zweidimensionale atomare Gitter Ladungsordnung aufweisen können. Sie entstehen aus dem kollektiven Verhalten der Elektronen, mit spontanen Strömen, ohne äussere Anregung. Guguchia war der Erste, der dies experimentell im Labor entdeckt hat, in einem Kagome-Gitter aus Kalium-, Vanadium- und Antimonatomen. Der Durchbruch gelang dank der

leistungsstarken Myonenquelle μS am PSI. Ein Myon – ein elektrisch geladenes Elementarteilchen, 200-mal schwerer als ein Elektron – dient im Experiment als hochsensibles mikroskopisches Messinstrument. Es wird in das Kagome-Gitter implantiert und bei seinem Zerfall beobachtet. Das liefert Informationen über das lokale Magnetfeld und damit über die spontanen Ströme, die in dem Ring aus sechs Atomen fliessen.

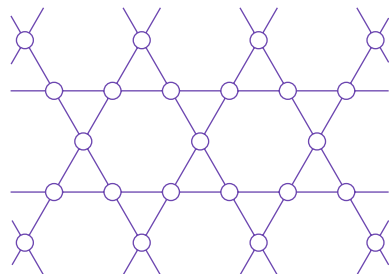
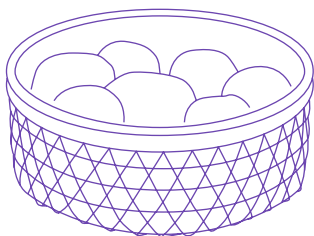
Während man typischerweise ein geeignetes Material auf rund minus 240 Grad Celsius abkühlen muss, damit es supraleitend wird, tritt im Kagome-Gitter dieser Effekt bereits bei etwa minus 190 Grad Celsius auf – eine Temperatur, bei der eine Kühlung mit relativ günstigem flüssigem Stickstoff möglich ist. Forschende vermuten auch, dass solche spontanen Ströme in Cupraten existieren könnten – jenen Hochtemperatur-Supraleitern, deren Entdeckung 1987 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde. Die Hoffnung wächst, dass die Anwendung der Kagome-Architektur auf diese Materialien ihre kritische Temperatur noch weiter steigern könnte.

Gesucht: Supraleiter bei Zimmertemperatur

Diese Hoffnung hat sich in den letzten Monaten verstärkt. Guguchia entdeckte kürzlich die Ladungsordnung in einem Kagome-Gitter bei Temperaturen bis zu 527 Grad Celsius – eine Erkenntnis, die in der renommierten Zeitschrift *Advanced Materials* veröffentlicht wurde. Während Supraleitung im selben Material typischerweise bei niedrigen Temperaturen auftritt, zeigten Guguchias Druckexperimente, dass sie nicht den konventionellen Regeln folgt. Dies wirft eine zentrale Frage auf: Könnte man die Ladungsordnung bei hohen Temperaturen unterdrücken? Und würde das einen Zustand nahe Raumtemperatur freilegen, in dem Strom ohne Widerstand und ohne Kühlung fliesst?

Als Grundlagenforscher bleibt Guguchia bescheiden: «Dieses Quantensystem ist sehr vielversprechend.» Aber die Implikationen sind kühn: Ein Raumtemperatur-Supraleiter würde die Energielandschaft revolutionieren: 40 Prozent des weltweiten Energieverbrauchs liesse sich einsparen mit Leitungen ohne elektrischen Widerstand.

«Mein Hauptinteresse gilt dem Verständnis der grundlegenden Mechanismen hinter ungewöhnlichen Quantenphänomenen und wie man diese optimiert», sagt Zurab Guguchia. «Das PSI mit seiner einzigartigen Kombination aus Grossforschungsanlagen und starken theoretischen sowie rechnergestützten Arbeitsgruppen ist die ideale Umgebung, um theoretische und angewandte Forschung zu vereinen.» ●



Atome im Muster

Kagome ist ein traditionelles japanisches Korbgeflecht. Das charakteristische Kagome-Muster aus Drei- und Sechsecken findet sich aber auch in der Anordnung der Atome, die Zurab Guguchia untersucht. Er setzte sein Kagome-Gitter unter Druck und erlangte Supraleitung bei einer höheren Temperatur als je zuvor in solchen Systemen erreicht worden war. Zugleich trat eine ungewöhnliche Form von Magnetismus auf. Guguchia sucht Wege, solche Effekte eines Tages sogar bei Zimmertemperatur oder darüber hinaus zu erreichen.

«Die Schweiz muss in der Quantenforschung weiter Gas geben»

Heike Riel ist IBM Fellow und leitet in Rüschlikon die Quantenforschung des Konzerns in Europa. Mit ihrem Team legt die Physikerin die Grundlagen für zukünftige Computer, die unvorstellbar schnell und energieeffizient sind.

Sie sind IBM Fellow, eine herausgehobene Position, die nur wenige im Unternehmen erreichen. Was ist Ihre Rolle?

Als IBM Fellow gebe ich Impulse für die Strategie des Unternehmens und bin kritische Ratgeberin fürs Management. Insbesondere ist es meine Verantwortung, innovative technische Projekte zu identifizieren und voranzutreiben, um technologische Durchbrüche im Bereich Zukunft des Computerwesens zu erzielen. Wir arbeiten an der Frage: Was ist die Zukunft des Computings und wie können wir die Leistung und Energieeffizienz weiter erhöhen? Deshalb entwickeln wir Quantencomputer und -algorithmen und erforschen auch neue Rechensysteme für künstliche Intelligenz als vielversprechende Kandidaten für die nächste Generation von Computertechnologien.

Damit hält die Quantenphysik Einzug in die Computertechnik?

Die Quantenphysik wird schon lange angewandt. Zum Beispiel bei Tunnelioden, die bereits 1957 erfunden wurden und inzwischen alltägliche elektronische Bauelemente sind. Es gibt viele weitere Technologien, die auf Quantenphysik basieren. Auch der Laser, der 1960 erfunden wurde, ist nicht mehr wegzudenken. In der heutigen zweiten Quantenrevolution versucht man, durch die Kontrolle einzelner Quantenzustände – wie Superposition und Verschränkung – die nächste technologische Stufe zu erreichen. Wir sind besonders an Quantencomputern interessiert, die potenziell Rechenaufgaben lösen können, die klassisch nicht lösbar sind. Viele Fortschritte wurden in den letzten Jahren im Bereich Quantencomputing erzielt, sodass skalierbare, fehlertolerante Quantenrechner mit 200 logischen Qubits auf unserer Roadmap im Jahr 2029 stehen.

Werden klassische Computer überflüssig?

Nein. Quantencomputer sind kein Ersatz für klassische Computer, sie sind eine Ergänzung. Wir werden

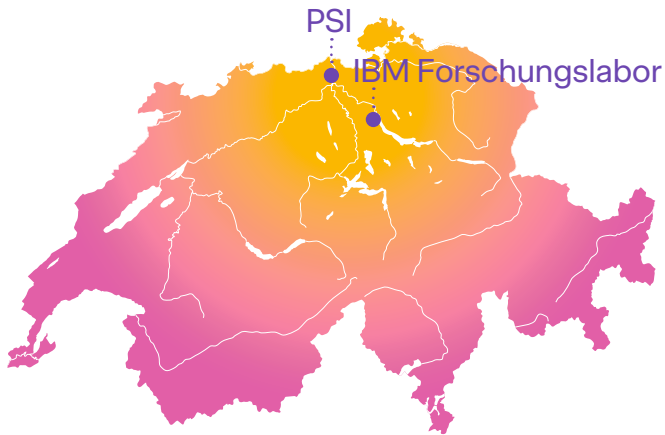


Forscherin, Visionärin, Vordenkerin: Heike Riel entwickelt bei IBM in Rüschlikon die Computertechnologie von morgen.

auch in absehbarer Zukunft E-Mails auf einem klassischen Computer schreiben oder damit im Internet surfen. Mit Quantencomputern wird man neue Aufgaben lösen, das fasziniert mich daran. Ein Beispiel ist unser Verständnis der Quantenphysik selbst: Quantensysteme lassen sich viel leichter mit Quantencomputern berechnen, weil sie der gleichen Physik unterliegen. Hier gab es in den letzten Jahren bemerkenswerte Fortschritte. Insbesondere durch geschickte Nutzung der Synergien von Quantencomputern und Hochleistungsrechnern und Fehlerreduktion hofft man, in den nächsten zwei Jahren einen Quantenvorteil zu erzielen.

Eine weitere Stärke von Quantencomputern ist zugleich eine Bedrohung für heutige Verschlüsselungsmethoden: Quantenrechner können sehr grosse Zahlen in ihre Primzahlen zerlegen und damit Verschlüsselungscodes brechen. Wie wollen Sie verhindern, dass dies für kriminelle Handlungen eingesetzt wird?

Die Zerlegung grosser Zahlen in Primzahlen schafft kein klassischer Computer, weshalb dies auch Grundlage der heutigen Verschlüsselungstechnologie ist. Ein fehlertoleranter Quantencomputer, der gross



Nicht nur geografisch nah: Das PSI und das Forschungslabor von IBM in Rüschlikon verbindet eine lange Geschichte gemeinsamer Projekte – und ein reger Austausch von Forschenden in beide Richtungen.

genug ist, aber schon. Das hat der Mathematiker Peter Shor 1994 theoretisch gezeigt. Darauf bereiten wir uns vor. Die Standardisierungsbehörde NIST in den USA empfiehlt drei neue Verschlüsselungsalgorithmen, die nach heutigem Wissen selbst mit den stärksten Quantencomputern nicht zu brechen sind. Zu diesen Algorithmen hat unser Team hier in Rüschlikon wesentliche Beiträge geleistet.

Sie haben 2022 einen offenen Brief von renommierten Forschenden mitunterzeichnet, der mehr Fördermittel für Quantentechnologien in der Schweiz anmahnt. Wie sehen Sie die Schweiz da inzwischen aufgestellt?

Quantentechnologien stecken weltweit immer noch in den Kinderschuhen, das Innovationspotenzial ist riesengross, ebenso die Dynamik der Entwicklung. Die Schweiz steht in einem harten internationalen Wettbewerb. Zuletzt gab es eine Schwächephase, nachdem die Europäische Union die Schweiz bei der Finanzierung von Forschungsprojekten zu Quantentechnologien ausgeschlossen hat. Daraufhin waren wir weniger attraktiv für junge Forschende, die sich um eine Förderung des Europäischen Forschungsrats bewerben wollten, und Start-ups sind abgewandert, vor allem nach Deutschland, das viel investiert hat. Die Zahl der Schweizer Patente in Quantentechnologien ist in dieser Zeit gesunken. Inzwischen hat die Schweiz die Delle kompensiert, auch dank Fonds, die das PSI und die ETH eingerichtet haben. Ausserdem können Schweizer Forschende jetzt wieder an den Ausschreibungen der EU teilnehmen. Die Schweiz hat nach wie vor eine sehr gute Ausgangsbasis durch eine starke Innovationskultur und etablierte Firmen in der Lieferkette rund um Quantentechnologien. Aber wir alle dürfen nicht nachlassen.

Wie ist die Zusammenarbeit von IBM in Rüschlikon mit dem PSI?

Die Wurzeln des PSI liegen im Betrieb von Grossforschungsanlagen, die auch wir IBM-Forschenden hin

und wieder nutzen. Zudem gibt es einen fruchtbaren Austausch von Promovierenden und Postdocs. Und schliesslich arbeiten wir sehr eng mit Kirsten Moselund zusammen, der Leiterin des Labors für Nano- und Quantentechnologien am PSI. Zuvor war sie 14 Jahre bei uns in Rüschlikon und hat hier eine grosse Forschungsgruppe in meiner Abteilung geleitet. Gemeinsam mit ihrem jetzigen PSI-Team arbeiten wir an innovativen Projekten die klassische Siliziumtechnik und Photonik verbinden und neue physikalische Effekte nutzen.

Bitte verraten Sie uns, an welchen Konzepten für künftige Computer Sie gerade arbeiten.

Wir arbeiten zum Beispiel an neuen Architekturen für künstliche Intelligenz, die mit nur 16, 8 oder 4 Bit rechnen statt wie heute üblich mit 64 Bit. Diese Chips liefern das gleiche Rechenergebnis, die gleiche Genauigkeit, aber schneller und bei geringerem Energieverbrauch. Ein weiterer spannender Ansatz ist IBMs NorthPole-Chip, bei dem die Speicher- und Rechenheiten eng miteinander verbunden sind und so die Energie zum Transport von Daten reduziert wird. Diese dem Gehirn nachgeahmte Architektur spart Zeit und Energie, vor allem bei Anwendungen der KI. Denn hier müssen viele Daten ständig zwischen Speicher und Logik hin- und hergeschoben werden. Das ist aber nur ein Zwischenschritt zu einer neuen Art von analogen Prozessoren, bei denen die Rechenoperationen direkt in der Speicherzelle ausgeführt werden, was enorme Vorteile für die Energieeffizienz und Geschwindigkeit bringt. Die Prozessoren mit geringerer Bitzahl sind schon in unseren Produkten und bei den In-Memory-Prozessoren haben wir schon erste funktionierende Prototypen, die zeigen, dass man einen grossen Vorteil in der Energieeffizienz und Rechenleistung erzielen kann. ●



Jenseits von Lithium-Technologien

Sarbajit Banerjee leitet das Labor für Batteriewissenschaften am Zentrum für Energie- und Umweltwissenschaften des PSI. Hier erforscht er die fundamentalen Prozesse in verschiedenen wiederaufladbaren Batterietypen. Mithilfe neuester Analysetechniken untersucht er Redoxreaktionen. Dabei werden während der Energiespeicherung und der Energiefreisetzung Elektronen zwischen zwei Reaktionspartnern ausgetauscht. Banerjees Forschung trägt dazu bei, neue Batteriematerialien zu entwickeln und weiter zu verbessern. So arbeitet er an einer nachhaltigen Energiezukunft, die über die bestehenden Lithium-Technologien hinausgeht.

Alltag & Forschung Oxidation

Viele Alltagserscheinungen beruhen auf Phänomenen, die auch in der Forschung von Bedeutung sind. Ein Beispiel dafür ist die Oxidation.

Text: Brigitte Osterath



Alltag

Vom Eisen zum Rost

Sauerstoff ist für uns Menschen lebenswichtig: Ohne dieses farb- und geruchlose Gas ersticken wir. Sauerstoff ist aber auch recht aggressiv, sprich er reagiert gerne und schnell mit anderen Stoffen. Dabei wirken die Sauerstoffmoleküle als Elektronenräuber, sie entziehen also anderen Elementen Elektronen und setzen dadurch weitere chemische Reaktionen in Gang. Die Wissenschaft spricht dabei von einer Oxidation.

Besonders freudig reagiert Sauerstoff mit unedlen Metallen wie Eisen, vor allem in Anwesenheit von Wasser. Dabei entsteht Eisenhydroxid, das anschliessend weiter zu Eisenoxid umgewandelt wird. Das Ergebnis dieser chemischen Reaktion: Rost. Die rotbraune Verbindung aus Eisen und Sauerstoff bildet eine poröse, brüchige Schicht auf dem Metall, die sich mit der Zeit ablöst und neues Eisen freilegt, das dann ebenfalls mit Sauerstoff reagiert. So schreitet die Zerstörung des Materials immer weiter fort. Selbst ein grosses Schiff aus Eisen zersetzt sich nach und nach und zerbröseln buchstäblich – aufgrund von Oxidation.

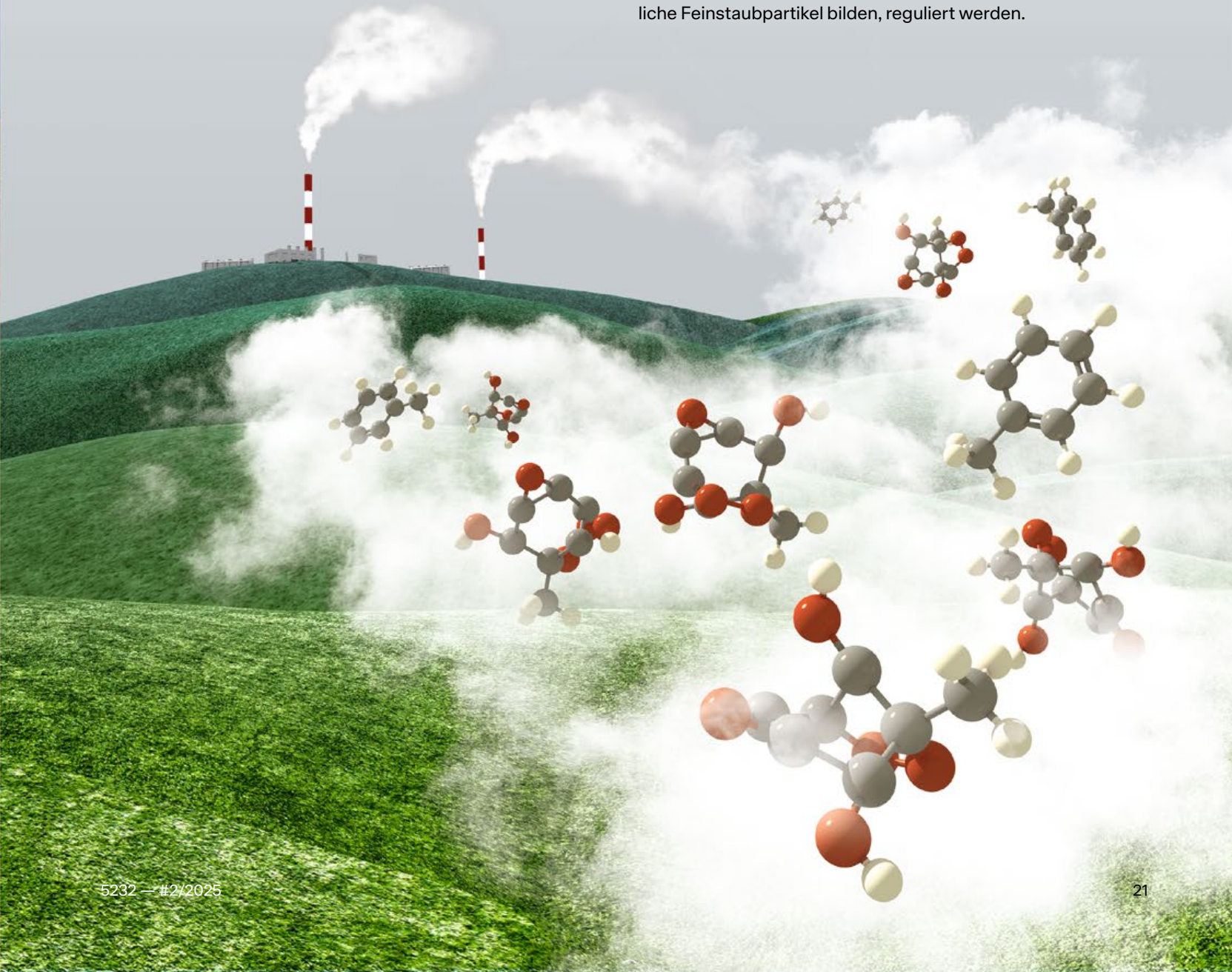
Forschung

Von Gasen zu Feinstaub

Nicht nur Eisen reagiert mit Sauerstoff in der Luft. Auch gasförmige Substanzen bilden durch Oxidation neue Verbindungen. Und diese können unter Umständen schädlich sein für den Menschen.

PSI-Forschende untersuchen Oxidationsreaktionen in der Erdatmosphäre, um zu verstehen, welche Substanzen dabei entstehen. So fanden sie kürzlich heraus, dass sich schädliche Feinstaubpartikel nach und nach bilden, wenn Sauerstoff mit Gasen wie Toluol oder Benzol reagiert. Diese sogenannten Vorläufergase stammen beispielsweise aus Auto- und Fabrikabgasen. Sobald sie in die Luft gelangen, durchlaufen sie eine Kaskade von Oxidationen und bilden am Ende feste Partikel: Feinstaub.

Die Ergebnisse der Forschenden deuten darauf hin, dass es nicht ausreicht, die direkten Feinstaubemissionen von Fabriken und Fahrzeugen zu reduzieren, etwa mit Partikelfiltern. Vielmehr müssen auch die Vorläufergase, aus denen sich später schädliche Feinstaubpartikel bilden, reguliert werden.



Eintausend Module für das CERN



Am CERN bei Genf werden kleinste Teilchen mit höchsten Energien aufeinander geschossen, um die grossen Fragen zum Universum zu klären. Die Detektoren, die die Teilchenkollisionen beobachten, benötigen immer wieder ein Upgrade. Lea Caminada und ihre Forschungsgruppe für Hochenergiephysik am PSI spielen dabei eine wichtige Rolle.



Im Treppenhaus des Park Innovaare unterhalten sich Lea Caminada, Leiterin der Forschungsgruppe für Hochenergiephysik am Zentrum für Neutronen- und Myonenforschung des PSI, und Wolfram Erdmann, Projektleiter des europaweiten Konsortiums, das einen bedeutenden Teil des nächsten CMS-Detektors am CERN baut.

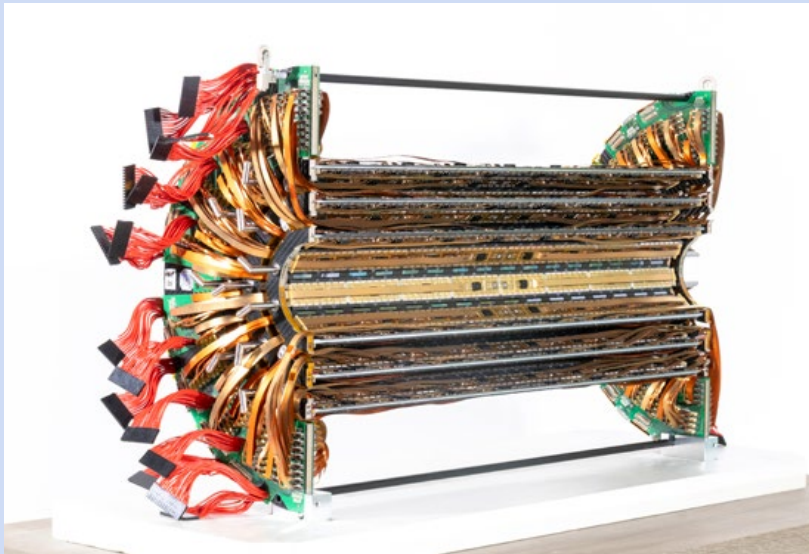
Text: Laura Hennemann

In einem geräumigen Labor im dritten Stock eines Neubaus gleich neben dem Paul Scherrer Institut steht eine Hälfte des Detektors, der das Higgs-Boson nachgewiesen hat. 2012 wurde dieses jahrzehntelang gesuchte Elementarteilchen am CERN experimentell bestätigt – und hat damit Geschichte in der Teilchenphysik geschrieben.

Entdeckt wurde das legendäre Teilchen mit dem Large Hadron Collider (LHC) des CERN – einem unterirdischen, 27 Kilometer langen Teilchenbeschleuniger. Im Tunnel des LHC werden stark beschleunigte Protonen aufeinander geschossen, um die Zerfallsprodukte dieser explosiven Teilchenkollisionen zu vermessen. Der LHC ist weiterhin im Einsatz, um Fragen der fundamentalen Physik unseres Universums zu klären. Und er muss mit der Zeit gehen: «Alle paar Jahre ist ein Upgrade an den riesigen Detektoren notwendig», erklärt Lea Caminada, Leiterin der Gruppe für Hochenergiephysik am Zentrum für Neutronen- und Myonenforschung des PSI. «Unter anderem, weil die hochenergetischen Teilchen, die die Detektoren ja registrieren sollen, über die Jahre auch unweigerlich deren Elektronik beschädigen», erklärt die Physikerin.

Um die winzigen Teilchen genau zu vermessen, braucht es Kolosse: Vier riesige Detektoren sind am LHC in Betrieb. Einer davon trägt den Namen «Compact Muon Solenoid», kurz CMS. Insgesamt fünfzehn Meter Durchmesser hat dieser in Zwiebelschichten aufgebaute Detektor. Lea Caminada beschäftigt sich quasi seit dessen Anfängen mit dem Aufbau von CMS und mit den experimentellen Ergebnissen, die er liefert.

Der innerste Teil von CMS, der zylindrische Pixeldetektor, hat die Form einer leicht überdimensionalen Biskuitrolle: Er ist rund fünfzig Zentimeter lang, besteht aus drei Schichten golden glänzender Elektronik und sehr vielen Kabeln. Er wurde einst am PSI entwickelt und gebaut, Lea Caminada war schon damals als Doktorandin beteiligt. Im Jahr 2017 wurde dieser erste Zylinder-Pixeldetektor ausgebaut und durch einen vierschichtigen Nachfolger ersetzt, der ebenfalls von Caminadas Gruppe designt und zum Teil gebaut worden war. Den ursprünglichen Zylinder-Detektor teilte man längs in seine zwei Hälften; die eine lagert nun als Ausstellungsstück in Caminadas



Der ursprüngliche Zylinder-Pixeldetektor des CMS-Experiments am CERN. Nachdem er ausgemustert wurde, lagert nun eine Hälfte in Caminadas Labor am Switzerland Innovation Park Innovaare, gleich neben dem Paul Scherrer Institut PSI.

Labor im neu gebauten Switzerland Innovation Park Innovaare direkt neben dem PSI.

In seiner aktuellen Konfiguration bleibt CMS noch bis Mitte 2026 im Einsatz. Dann steht ein grösseres Upgrade am gesamten LHC an: Die Anzahl der Teilchenkollisionen wird weiter erhöht und bei dieser Gelegenheit werden viele Bauteile der Detektoren ein weiteres Mal durch neue, technologisch verbesserte Teile ersetzt.

Endkappen gegen den toten Winkel

Im Jahr 2030 soll der LHC dann unter dem Namen «High-Luminosity LHC» wieder an den Start gehen. An den einzelnen neuen Komponenten von CMS, die in der Umbauphase von 2027 bis 2030 eingebaut werden, arbeiten derzeit viele Forschungsgruppen weltweit. Diesmal ist Caminadas Gruppe nicht für den nächsten Zylinder-Pixeldetektor zuständig, sondern für scheibenförmige Bauteile, die senkrecht vor und hinter dem Zylinder-Detektor angebracht werden.

«Diese Scheiben bilden das, was wir den Tracker-Endkappen-Detektor nennen», erklärt Caminada. «Das wird ein komplett neuer Teil des CMS-Detektors. Mit ihm werden wir Teilchenspuren nachverfolgen können, die im toten Winkel des bisherigen Detektors liegen.» Verschiedene Teilchenzerfälle, die bei den Proton-Proton-Kollisionen im LHC entstehen

«Wir haben jetzt schon mehrere Generationen dieses Detektors mitentwickelt und kennen alle Schritte, vom Chipdesign über die Installation bis zur Auswertung der Daten.»

Wolfram Erdmann, Forscher am Zentrum für Neutronen- und Myonenforschung des PSI

könnten, werden in verschiedenen Raumwinkeln erwartet. Wer nach neuer Physik sucht, muss dort schauen, wo bisher noch niemand hinsehen konnte.

Die insgesamt 16 runden Scheiben des Tracker-Endkappen-Detektors haben je einen Durchmesser von 50 Zentimetern und jede wird sowohl auf ihrer Vorder- als auch auf ihrer Rückseite mit Silizium-Detektormodulen bestückt sein.

«Um all diese Flächen gründlich abzudecken, werden wir um die zweitausend baugleiche Detektormodule benötigen», erklärt Caminada. Die rechteckigen Module sind kleiner als ein Handteller. Es sind hochkomplexe elektronische Bauteile, die extrem präzise verarbeitet sein müssen, um hochzuverlässig zu funktionieren. «Nachdem Upgrade wird der gesamte Detektor über mehrere Jahre im Einsatz bleiben – und wir können während dieser Zeit nichts ausbauen und keine Reparaturen durchführen.» Es ist, als würde man eine Sonde ins All schicken – während des Betriebs verliert man jeglichen physischen Zugriff auf die Komponenten. Und jede noch so geringe Fehlerwahrscheinlichkeit, die man bei einem einzelnen Bauteil in Kauf nimmt, erhöht sich für den gesamten Detektor – der hohen Anzahl an Modulen entsprechend – um den Faktor zweitausend.

Zwei Jahre für die Produktion der Module

Amrutha Samalan setzt vorsichtig ein Modul nach dem anderen in die passgenauen Mulden einer weissen verkabelten Kiste. «Über die letzten Jahre haben wir verschiedene Prototypen der Module untersucht und getestet, um den Modul-Designern immer wieder rückzumelden, wo sich zwar unwahrscheinliche, aber aufgrund der grossen Stückzahl doch relevante Probleme ergeben», erklärt die Postdoktorandin, die seit bald zwei Jahren in Lea Caminadas Gruppe arbeitet.

Inzwischen ist die Design-Phase abgeschlossen. Die Vorproduktion ist im Gange.

Vorproduktion bedeutet: An einer kleineren Anzahl Module testen die Forschenden, ob jede Fertigungsstufe gut funktioniert und das Ergebnis genau den Erwartungen entspricht. Und sie machen in dieser Phase eine Zeitabschätzung für die Produktionsschritte, um später alles hochskalieren zu können. Von den rund zweitausend benötigten Modulen werden dann – während der tatsächlichen Produktionsphase – knapp die Hälfte am PSI zusammengesetzt. Die übrigen Module werden nach dem am PSI entwickelten Konzept von den anderen Teilnehmenden eines europaweiten Konsortiums erstellt. Alle gemeinsam werden sie zwei Jahre Zeit haben, um die zweitausend Module herzustellen.

«Heute Vormittag habe ich das Drahtbunden von einigen Modulen gemacht; an dieser Maschine.» Samalan deutet auf einen etwa menschengrossen Kasten in der Mitte des Labors. «Sie schreibt unsere einprogrammierten elektronischen Verbindungen auf das Modul – ein bisschen so, wie eine Nähmaschine mit Fäden arbeitet.»

Darauf folgt eine genaue visuelle Überprüfung: Nahaufnahmen jedes einzelnen Moduls werden am Bildschirm auf Fehler kontrolliert.

Anschliessend kommen jeweils acht Module zusammen in eine sogenannte Cold Box – die weisse Kiste, die Samalan nun bestückt. «Darin machen wir einen wichtigen Teil der Qualitätskontrolle: Wir können die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Kiste genau kontrollieren und währenddessen testen, ob die Sensoren, die Auslesechips und die Pixel alle fehlerfrei sind», erklärt die Physikerin. Auch die Kalibrierung aller Detektorpixel und ihrer Kanäle führen die Forschenden in dieser Cold Box durch. Mehr als eine halbe Million Pixel hat jedes einzelne Modul. Mit einer Ortsauflösung von nur zehn mal fünfzehn Mikrometern werden sie Teilchenbahnen im CMS-Detektor genau nachverfolgen können.

Die Planung der übernächsten Generation

Einen Stock weiter oben im selben Gebäude hat sich Wolfram Erdmann gerade mit einigen Kollegen besprochen. Auch er ist Mitarbeiter in Caminadas Gruppe. Und er leitet das internationale Projekt zu Design, Planung und Bau des Tracker-Endkappen-Detektors. «Nach dem Upgrade wird das der flächenmässig grösste Teil des CMS-Pixeldetektors sein», sagt er mit leichtem Stolz.

Erdmann hält den Kontakt zu den anderen Forschungsgruppen des Konsortiums an den Universitäten Zürich, Hamburg, Helsinki in Finnland, Santander in Spanien, Vilnius in Litauen und Zagreb in Kroatien.

«Hier am PSI entwickeln wir viele Bauteile und viele Prozesse, die an diesen anderen Orten dann dupliziert werden», so Erdmann. Die Cold Boxen beispielsweise.

Schon seit 1998 ist das PSI Mitglied des CMS-Experiments. «Das ist eine bedeutende Verpflichtung und es erfordert ausserordentliches Fachwissen», so Caminada. Der LHC als weltweit grösster und leistungsfähigster Beschleuniger ist für ihr Gebiet der Teilchenphysik essenziell. Die geographische Nähe ist da willkommen: «Es ist für uns durchaus praktisch, dass die Schweiz Gastgeberland des CERN ist», so Erdmann.

Auch an der Auswertung der Daten, die der CMS-Detektor liefert, ist Caminadas Forschungsgruppe beteiligt. «Wir haben jetzt schon mehrere Generationen dieses Detektors mitentwickelt und kennen die gesamte Kette der Schritte, vom Chipdesign über die Installation bis zur Auswertung der Daten», fasst Erdmann zusammen. «Das ist unter den beteiligten Institutionen schon aussergewöhnlich.»

Die Daten des Tracker-Endkappen-Detektors, dessen Produktion nun anläuft, werden voraussichtlich Anfang der 2030er-Jahre ausgewertet werden. In der Teilchenphysik wird über lange Zeiträume hinweg geplant. Entsprechend machen sich auch einige Forschende bereits Gedanken zum übernächsten Upgrade. «Tatsächlich habe ich vorhin mit den Kollegen genau darüber gesprochen», schmunzelt Erdmann. Vor allem in die Zeitauflösung des Detektors wollen die Forschenden dann investieren.

Dass Erdmann und weitere Forschende schon jetzt Ressourcen für diese Überlegungen bekommen, findet der Physiker nicht ungewöhnlich. Aus seiner langjährigen Erfahrung weiss er: «Sich Gedanken machen ist relativ einfach. Komplex wird es, das hinterher zu bauen.» ●



Amrutha Samalan setzt eine Reihe Detektor-Module in die Cold Box, in der ein wichtiger Teil der Qualitätskontrolle erfolgt.

Aktuelles aus der PSI-Forschung

1 Dem Atomkern so nah wie nie

1,97007 Femtometer – also knapp zwei milliardstel Meter: So winzig ist der Radius des Atomkerns von Helium-3. Zu diesem präzisen Ergebnis kommt ein Experiment am PSI. Dafür haben die Forschenden ein Helium-3-Atom radikal umgebaut: Statt zwei Elektronen umkreist ein rund 200-mal schwereres Myon den Atomkern. Weil das gewichtige Myon dem Kern deutlich näherkommt, überlappen sich die Wellenfunktionen stärker – damit wird das Myon zur perfekten Sonde zur Vermessung des Ladungsradius.

Entscheidenden Anteil am Erfolg hatte ein eigens entwickeltes Lasersystem. Trifft die Laserfrequenz exakt den Resonanzpunkt eines bestimmten atomaren Übergangs, springt das Myon für einen winzigen Moment in einen höheren Energiezustand – und fällt binnen Piko-sekunden wieder zurück. Dabei sendet es ein Röntgenphoton aus. Diese messbare Reaktion erlaubt es den Forschenden, die Resonanzfrequenz zu bestimmen – und daraus den Ladungsradius mit höchster Präzision abzuleiten.

Das Experiment war nur dank der weltweit einzigartigen Myonenquelle am PSI möglich und setzt neue Massstäbe in der Kernphysik.

Weitere Informationen:
<https://bit.ly/45BpSKO>



2 Genetische Störungen erkennen

In der modernen Medizin geht es zunehmend darum, krankheitsrelevante Gene früh zu erkennen und gezielt zu beeinflussen. Bei komplexen Erkrankungen wie Krebs, Alzheimer oder chronischen Entzündungen reicht es aber nicht, einzelne Gene zu betrachten – entscheidend ist, wie sie im Zellnetzwerk zusammenwirken. Eine wichtige Rolle spielt dabei die dreidimensionale Organisation der DNA im Zellkern, das sogenannte Chromatin.

Forschende am PSI haben nun eine künstliche Intelligenz namens Image2Reg entwickelt, die genetische Störungen direkt in mikroskopischen Zellbildern erkennt. Die KI analysiert subtile Veränderungen im Chromatin, wie sie etwa nach einer Hoechst-Färbung sichtbar werden, und verknüpft diese mit Daten zur Genaktivität. Daraus entsteht ein Zelltyp-spezifisches Netzwerk, das aufzeigt, wie Gene miteinander interagieren. In Tests erkannte Image2Reg genetische Veränderungen mit einer Genauigkeit von 26 Prozent – deutlich über dem Zufallsniveau von zwei Prozent. Das Verfahren könnte künftig eine schnelle und kostengünstige Ergänzung zu klassischen Genexpressionsanalysen werden.

Weitere Informationen:
<http://bit.ly/4IOYSwf>



3 Präzise Strahlkraft gegen Lymphdrüsenkrebs

Jedes Jahr erkranken in der Schweiz knapp 2000 Menschen an Lymphdrüsenkrebs, etwa 570 davon sterben an der Krankheit. Forschende am Zentrum für radiopharmazeutische Wissenschaften des PSI haben nun eine innovative Therapie entwickelt, die neue Hoffnung geben könnte: eine Radioimmuntherapie mit dem Nuklid Terbium-161.

Dabei wird Terbium-161 an einen Antikörper gekoppelt, der gezielt an Tumorzellen bindet. Nach der Injektion transportiert er die Strahlung direkt zu den Krebszellen und schont dabei das gesunde Gewebe.

Im Vergleich zum bisher eingesetzten Lutetium-177 bietet Terbium-161 einen entscheidenden Vorteil: Neben der Beta-Strahlung, die sich im Gewebe über mehrere Millimeter ausbreitet, emittiert es auch Auger-Elektronen mit einer Reichweite von weniger als einem Mikrometer – ideal, um einzelne Krebszellen oder kleine Zellnester gezielt zu zerstören. In Labortests zeigte sich Terbium-161 je nach Zelltyp zwei- bis 43-mal wirksamer als Lutetium-177.

Derzeit bereiten die Forschenden klinische Studien mit dem Ziel vor, eine neue, präzise Waffe gegen schwer behandelbare Lymphome zu schaffen.

Weitere Informationen:
<http://bit.ly/3JrFNTn>



4 KI-Kochbuch für klimafreundlichen Zement

Zement ist das, was unsere moderne Welt im Innersten zusammenhält. Das unscheinbare Pulver vermischt mit Sand, Kies und Wasser wird zu Beton – einem Baustoff, der sich nahezu überallhin transportieren und in fast jede erdenkliche Form giessen lässt. Damit werden nicht nur Gebäude, Brücken und Tunnel gebaut und Berge und Täler überwunden – selbst unsere Kommunikation verläuft durch Leitungen, die durch schützende Betonrohre unterirdisch verlegt worden sind. Beton ist multifunktional und beständig und deshalb aus unserer Infrastruktur nicht wegzudenken.

Die Zementproduktion hinterlässt jedoch einen gigantischen CO₂-Fussabdruck: Sie ist für rund acht Prozent der weltweiten Emissionen verantwortlich – mehr als der globale Flugverkehr. Hauptverantwortlich ist die chemische Umwandlung von Kalkstein zu Klinker, dem zentralen Bestandteil von Zement. Im Kalkstein ist CO₂ chemisch gebunden und wird bei der Reaktion freigesetzt.

Forschende des PSI haben nun ein physikbasiertes, KI-gestütztes Modell entwickelt, mit dem sich neue Zementrezepturen schneller entdecken lassen – bei gleicher Materialqualität und deutlich geringerer CO₂-Bilanz. Das Modell liefert gezielt Vorschläge für die vielversprechendsten Rezepturen, welche anschliessend im Labor getestet werden können – wie ein digitales Kochbuch für klimafreundlichen Zement.

Weitere Informationen:
<http://bit.ly/41KNxGn>



Rund **1,5** Kilogramm Zement pro Person und Tag – unser Zementhunger ist enorm.

1000 -mal schneller als klassisches Modellieren: Die PSI-KI berechnet Zementeigenschaften in Stunden statt in mehreren Monaten.

Rund **8** Prozent der globalen CO₂-Emissionen werden von der Zementindustrie verursacht – das ist mehr als der gesamte weltweite Flugverkehr.

Das PSI als Stadt

Wenn man genau hinschaut, ähnelt das PSI einer kleinen Stadt. Wir stellen eine Auswahl von elf Einrichtungen und Dienstleistungen vor, die sich auf dem 342 000 Quadratmeter grossen Gelände des Instituts befinden. Sie stehen den 2300 Beschäftigten zur Verfügung – und teilweise auch weit darüber hinaus.

Text: Christian Heid



Das Spital

Barbara Bachtiry arbeitet als Ärztin im Zentrum für Protonentherapie ZPT. Die Protonentherapie ist eine äusserst präzise, hochkomplexe Form der Strahlentherapie, die im Rahmen einer ambulanten Krebsbehandlung eingesetzt wird. Patientinnen und Patienten werden aus der ganzen Schweiz überwiesen. Bei Kindern ist sie der Goldstandard der Radiotherapie. Bei Erwachsenen wird sie bei Tumoren in sensiblen Körperregionen angewendet, zum Beispiel im Hirn, im Kopf-Hals-Bereich oder in der Nähe von Nerven.



Die Feuerwehr

Neben ihrer Arbeit als Chemielaborantin am PSI engagiert sich Sasha Alexandra Diaz freiwillig bei der PSI-Betriebsfeuerwehr – zusammen mit 90 weiteren Mitarbeitenden aus allen Bereichen des PSI. Primär ist die Betriebsfeuerwehr für die Rettung von Personen und für die Brandbekämpfung zuständig. Sie arbeitet auch eng mit den nahe gelegenen Feuerwehren Würenlingen und Geissberg zusammen, um bei der Brandbekämpfung im Umland zu helfen. Die PSI-Feuerwehr ist zudem kantonaler Strahlenwehrstützpunkt und hilft Ortsfeuerwehren im ganzen Kanton bei Notfällen, in denen radioaktive Stoffe eine Rolle spielen.



Der Stadtpräsident

Wie bei einem Stadtpräsidenten ist der Terminkalender von Christian Rüegg, Direktor des PSI, prall gefüllt – teils bis in den Abend und ins Wochenende hinein: Besprechung, Interview, Vortrag, Empfang ... Unterstützt von seinem Sekretariat, dem Direktionsstab, den Leitern der Forschungszentren und der Forschungskommission geht er seiner wesentlichen Aufgabe nach und ermöglicht Spitzenforschung in Natur- und Ingenieurwissenschaften. So setzt er sich dafür ein, dass die Schweiz einen wichtigen Platz in der internationalen Forschungslandschaft einnimmt und das PSI zusammen mit dem ganzen ETH-Bereich der Schweiz optimal nützt.

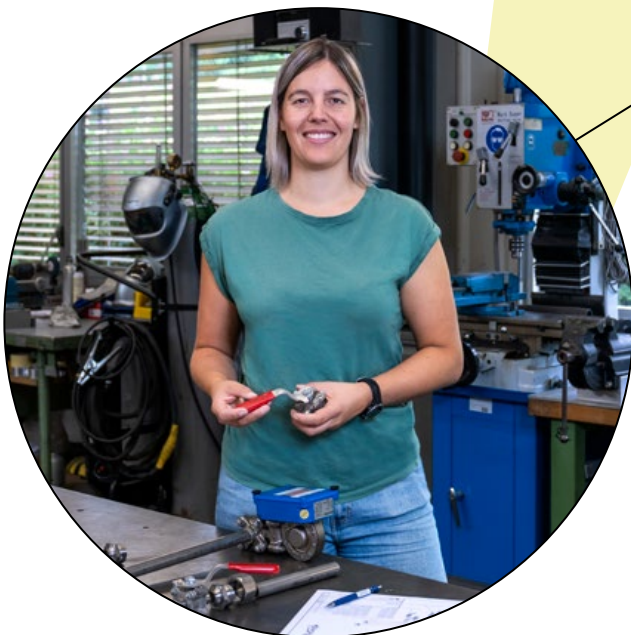
Das Hotel

Das PSI hat ein eigenes Gästehaus. Hier arbeitet Rolf Pederiva am Empfang. Vierundsechzig Zimmer auf drei Etagen stehen vor allem Gastforschenden aus der ganzen Welt zur Verfügung, die Experimente an den fünf Grossforschungsanlagen des PSI durchführen. Um die jährlich mehr als 2200 Gäste kümmert sich ein mehrköpfiges Serviceteam. Das Gästehaus liegt neben einem kleinen Biotop direkt an der Aare und bietet neben den Zimmern auch eine Gemeinschaftsküche, eine Waschküche, einen Aufenthaltsraum und einen Aussensitzplatz.



Die Werkstatt

Karin Zehnder hat am PSI eine Lehre als Polymechnikerin abgeschlossen. Heute arbeitet sie als Konstruktionstechnikerin und Projektleiterin für die Sektion Prozesskühlung in der Rohrleitungsbauwerkstatt. Neben einer Elektrowerkstatt, einer Sanitärwerkstatt, einer Stahlbauwerkstatt und einer Lehrwerkstatt gibt es auch eine zum PSI gehörige Werkstatt im benachbarten Park Innovaare. Hier werden diverse Technologien genutzt – von Spezialfügeverfahren bis hin zur klassischen spanabhebenden Bearbeitung.



Die Wäscherei

Rund dreiundsiebzig Tonnen Wäsche bewältigen Senta Schneider und ihre drei Kolleginnen jährlich in der PSI-eigenen Wäscherei. Das Team betreibt auch das Kleider- und Schuhlager, wo alle PSI-Mitarbeitenden persönliche Schutzbekleidung für ihre Arbeit beziehen können. In der Wäscherei werden die Kleidungsstücke fachgerecht angepasst, instand gehalten und bei Bedarf repariert, sodass allen Angestellten jederzeit saubere, funktionale und sichere Arbeitskleidung zur Verfügung steht.



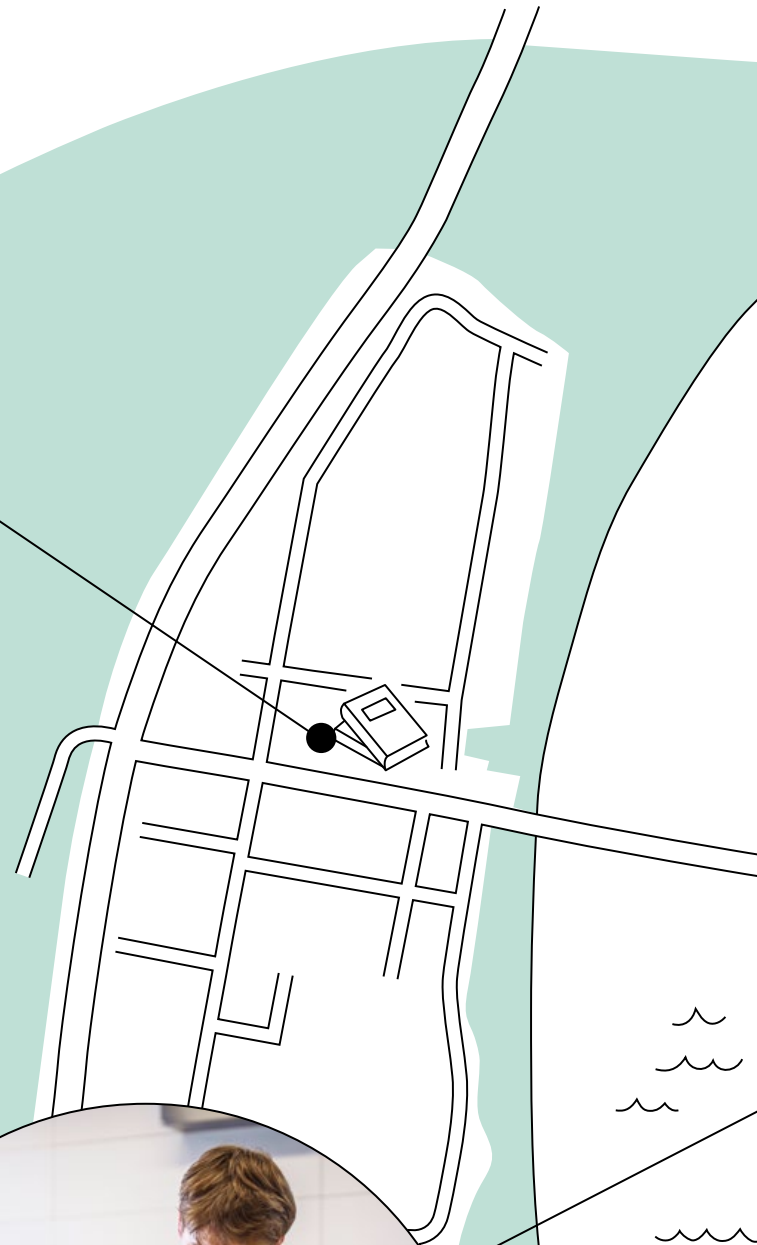
Die Kindertagesstätte

Lino Bärtschi reicht Holzbausteine, liest vor, wechselt Windeln, gibt zu essen und tröstet. Als Lerner in der Kita Nanolino ist er Teil des Teams, das auf sechs Gruppen verteilt rund 120 Kinder betreut. Die PSI-Kindertagesstätte steht Kleinkindern ab drei Monaten offen. Genutzt wird dieses Angebot hauptsächlich von Eltern, die am PSI arbeiten, aber auch von Familien, die in der Umgebung wohnen. Im Sommer 2025 wurde der moderne Neubau eröffnet, in dessen verspielter Gartenlandschaft sich die Kleinsten dank Bobby-Car-Bahn, Murbelbahn, Sandkasten und Wasserpumpe austoben können. Auch Spaziergänge im angrenzenden Würenlinger Wald gehören für die Kinder fast täglich zum Programm.



Die Bibliothek

Bücher spielen für Stephanie Hofmann und das Team der Bibliothek Lib4RI natürlich eine wichtige Rolle. Der Präsenzbestand macht aber mittlerweile nur noch einen kleinen Teil des Angebots aus. Wichtiger ist der Zugang zu digitalen Medien. Zum ungestörten Arbeiten gibt es einen kleinen Leseraum. Die Bibliothek hilft den PSI-Forschenden beim Recherchieren wissenschaftlicher Literatur und unterstützt sie beim Publizieren ihrer Forschungsergebnisse. Im breit gefächerten Schulungsangebot geht es unter anderem um den professionellen Umgang mit Forschungsdaten, Copyright und Open Access.



Das Restaurant

Warme und kalte Speisen zuzubereiten und schön zu präsentieren, gehört zum Arbeitsalltag von Remy Bonetta. Er ist als Lernender einer von vierzig Mitarbeitenden im PSI-Personalrestaurant Oase und der angeschlossenen Cafeteria. Zur Mittagszeit zwischen 11.30 und 13.30 Uhr werden dort den PSI-Mitarbeitenden sowie Besucherinnen und Besuchern des PSI täglich wechselnde Menus sowie ein Buffet angeboten. Zu den PSI-Gastronomiebetrieben gehören ausserdem noch auf dem Ost-Areal eine weitere Cafeteria sowie westlich der Aare im Park Innovaare das Restaurant Culinaare mit Kaffeebar.



Das Museum

Das PSI zeigt sich der Öffentlichkeit auch mit einem eigenen Museum, das keinen Eintritt kostet, dem PSI Visitor Center. Hier empfangen Grégoire Saerens und seine Kolleginnen Besuchende: von Montag bis Freitag und an Sonntagen, jeweils von 13 bis 17 Uhr. Die dreizehn interaktiven Exponate der Ausstellung lassen erleben, woran am PSI geforscht wird. Wer sich im Voraus anmeldet, kann zusätzlich eine kostenfreie Führung über das PSI-Areal buchen und dann Einblicke in die ein oder andere Forschungsanlage erhalten. Ein besonderes Besucherlebnis steht Schulklassen zur Verfügung: Durch ihre Lehrpersonen angemeldet, können jährlich rund 200 Klassen einen Tag am PSI iLab verbringen und dort unter Anleitung eigene Experimente durchführen.

Das Fitnessstudio

Seitliche Dehnung, Schulterbrücke, Bauchmuskeln. Reto Fortunati ist Ingenieur am Zentrum für Beschleunigerwissenschaften und -technologien des PSI, doch in seiner Mittagspause unterrichtet er regelmässig Pilates in der Sporthalle auf dem PSI-Campus. Zugänglich sind seine Stunden den 750 Mitgliedern des PSI-Sportclub, der auch Badminton, Fussball, Klettern, Tanzen, Yoga und vieles mehr bietet. Die Laufgruppe nutzt die ausgedehnten Wälder rund um das PSI. Andere treffen sich zum Schwimmen in der Aare – die Hartgesottener sogar im Winter.



Wo Analyse auf Aromen trifft

Manche sehen Bierbrauen als Kunst, andere als Wissenschaft – Luc Van Loon vereint in seiner Brauerei beide Tugenden. Mit der Nase eines Sommeliers und der Präzision eines Chemikers kreiert der ehemalige PSI-Forscher Biere auf Weltklasse-Niveau.

Text: Benjamin A. Senn

Der Eingang zur Brauerei ist unscheinbar – mitten im Wohnquartier im beschaulichen aargauischen Neuenhof, wo stattliche Riegelhäuser und plätschernde Dorfbrunnen den nahen Autobahnlärm vergessen lassen. Hier, verborgen in einem alten Weinkeller, befindet sich die Brauerei Chen Van Loon. Und hier entsteht auch das *Sauvignon Ale* – jenes Bier, das 2024 bei der «Finest Beer Selection», einem international renommierten Wettbewerb, von der Jury zum drittbesten Bier der Welt gekürt wurde.

Klein aber fein könnte man sagen. «Wir sind eine Mikrobrauerei», erklärt der Braumeister und ehemalige PSI-Chemiker Luc Van Loon. Zehn verschiedene Biere entstehen hier – mit einer maximalen Kapazität von 32 000 Litern pro Jahr. «So viel produziert Feldschlösschen in einer Stunde», fügt er mit einem Augenzwinkern über die grösste und bekannteste Brauerei der Schweiz hinzu. «Wir spielen da definitiv in einer anderen Liga – unser Fokus liegt auf handwerklicher Vielfalt und kreativen Braustilen. Und genau das hat die Jury überzeugt.»

Doch wie kommt ein Chemiker zum Bierbrauen? Klar, der Prozess selbst lässt sich präzise in Formeln fassen – das ist pure Chemie. Doch Luc Van Loon kam nicht wegen der Wissenschaft, sondern über den Wein zum Bier.

Vom Chemiker zum Winzer zum Bierbrauer

2005 pachtete Luc Van Loon einen zwölf Aren grossen Rebberg und begann, in seiner Freizeit im Keller des Weinguts zum Sternen in Würenlingen Wein zu keltern. Damals arbeitete der gebürtige Belgier bereits seit fast zwanzig Jahren am PSI, in unmittelbarer Nähe zu seinem Weinberg. Eigentlich hatte er sich bei der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) um eine Stelle beworben. Da dort gerade keine Vakanz bestand, leitete man seine Unterlagen kurzerhand ans PSI weiter. Was folgte, lässt sich in seinen Worten recht simpel zusammenfassen: Ein Anruf vom PSI, ein eintägiges Vorstellungsgespräch vor Ort und ein freundliches: «Sie können anfangen».

Und so wanderte die Familie Van Loon mit ihren zwei Söhnen am 2. November 1988 aus: vom belgischen Merksplas ins Schweizer Kleindöttingen. Luc Van Loon hatte zuvor an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Löwen promoviert – in Radioökologie. Thema seiner Doktorarbeit: wie sich das langlebige Radionuklid Technetium-99 – ein Relikt aus den Atomwaffentests der 1960er-Jahre – in landwirtschaftlichen Produkten verhält. Ein feines Gespür für Böden, Landwirtschaft und menschliche Einflüsse brachte er also bereits aus dem Studium mit.

Während Van Loon in seiner Freizeit die Rebstöcke pflegte, im Herbst Trauben las, sie kelterte und ihren Saft gären liess, untersuchte er als Geochemiker und Leiter der Forschungsgruppe für Diffusionsprozesse am PSI ganz andere Substanzen. «Wir wollten verstehen, wie sich radioaktive Materialien in unterschiedlichen Werkstoffen verhalten – etwa, wie Radionuklide durch Opalinuston wandern und welche Wechselwirkungen dort stattfinden», so Van Loon.

Opalinuston ist ein feinkörniges, tonhaltiges Gestein, das vor rund 173 Millionen Jahren durch Schlammablagerungen am Meeresgrund entstand – heute liegt es mehrere hundert Meter unter der Erdoberfläche und ist insbesondere für die Einlagerung radioaktiver Abfälle in Tiefenlagern interessant, da es dort als natürliche Barriere dienen kann. «Unsere Studien haben dazu beigetragen, die Barriereigenschaften dieses Gesteins besser zu verstehen», sagt Van Loon.

Die Experimente dazu fanden im Hotlabor des PSI statt, einer einzigartigen Anlage zur materialanalytischen Untersuchung hoch radioaktiver Stoffe. Das Labor ist nur über Sicherheitsschleusen zugänglich und mit dicken Betonwänden umgeben. Labor Kittel ist Pflicht, frische Luft eine Rarität. «Da war die körperliche Arbeit im Rebberg ein willkommener Ausgleich», so Van Loon mit einem Lächeln.

Diese Arbeit war mitunter schweisstreibend – und machte durstig. «You have to drink a lot of beer to make a good wine», witzelte der Australier Christopher Chen über die harte Arbeit im Rebberg. Chen arbeitete damals als Önologe auf dem Weingut zum Sternen und fand im Hobbywinzer Van Loon – der als Belgier zudem einer echten Biernation entstammt – einen





Beer for Beginners – ein Grundrezept

- Malz mit Wasser vermischen und auf 65 °C erhitzen – dabei entsteht Zucker.
- Die entstandene Würze filtern und auf ca. 98 °C erhitzen (sterilisieren).
- Hopfen hinzufügen – für Aroma und Bitterkeit.
- Für etwa 10 Tage in Gärtank mit Hefe geben – es entsteht Alkohol und Kohlensäure.
- Jungbier auf 10 °C kühlen und in Flaschen füllen.
- Für natürliche Kohlensäure: etwas Hefe und Zucker zugeben und Flaschengärung abwarten.



«Wir sind ein waschechter Familienbetrieb – und das ist schön so.»

Luc Van Loon, Braumeister

Gleichgesinnten in Sachen Bier. Und so begannen die beiden Freunde 2013, aus reiner Experimentierfreude, in einem alten Suppenkessel im Weinkeller ihr erstes Bier zu brauen.

Weil sie keine Flaschen zum Abfüllen vorbereitet hatten, mussten ein paar alte Champagnerflaschen aus dem Weinkeller dafür herhalten – und so entstand eher zufällig die bis heute charakteristische Flaschenform ihrer Biermarke. Bald wurde in eine 200-Liter-Anlage investiert – doch die Produktion kollidierte zunehmend mit dem Weinbetrieb. Also zogen sie 2015 nach Neuenhof – wiederum in einen alten Weinkeller.

Die Wissenschaft des Brauens

Vier einfache Zutaten stecken in Bier: Wasser, Malz, Hefe und Hopfen – und doch ist die geschmackliche Vielfalt, die daraus entstehen kann, fast grenzenlos. «Es gibt über fünfzig Malz- und rund zweihundert Hopfensorten – von den unzähligen Hefestämmen ganz zu schweigen», so Van Loon. Hinzu kommen äussere Parameter wie Temperatur, Gärdauer oder Lagerung, die den Biercharakter prägen. «Das macht Bier für mich deutlich spannender als Wein.»

Luc Van Loon zapft aus einem der grossen, silbernen Gärbottiche ein Glas voll goldglänzender, bernsteinfarbener Flüssigkeit und begibt sich damit zu seinem Stehlabor. Mit einer Pipette und diversen Messgeräten macht er sich an die Analyse. Jetzt fehlten nur noch Laborkittel und Handschuhe – und man könnte fast meinen, man befände sich wieder in einem Labor am PSI statt in einer Brauerei.

Der Tropfen aus der Pipette landet im Refraktometer. Das Gerät sieht ein bisschen aus wie ein Fernrohr – doch statt in die Ferne blickt man damit ins Innere der Flüssigkeit. Je nach Dichte des Biers wird das einfallende Licht darin in einem anderen Winkel gebrochen – so lässt sich der Zuckergehalt bestimmen. Und der wiederum verrät, wie weit die Gärung ist, also wie viel Zucker sich schon in Alkohol umgewandelt hat. Ein Infrarotgerät zur Messung des effektiven Alkoholgehalts und eine pH-Elektrode liegen ebenfalls bereit. «Was noch fehlt, ist ein Gerät zur Bestimmung der Bitterkeit und der Farbe», so Van Loon. «Dann wäre mein Labor komplett.»

Wenn Luc Van Loon über seine Analysemethoden spricht, merkt man: Hier ist nicht nur ein

leidenschaftlicher Brauer, sondern auch ein erfahrener Wissenschaftler am Werk; einer, der sich auch mit Qualitätskontrollen auskennt. Am PSI war Van Loon für das Qualitätsmanagement im Labor für Endlagersicherheit verantwortlich. «In der Brauerei ist das nicht anders», so der Braumeister. «Auch hier halten wir unsere Prozesse fest und prüfen die Qualität unserer Produkte – das Bier soll schliesslich immer gleich gut schmecken – mit konstanter Farbe, Alkoholgehalt und Charakter.

Vom Jux zum Familienbetrieb

Seit über zehn Jahren braut Luc Van Loon nun schon Bier – und seit seiner Pensionierung 2024 nicht mehr nur am Wochenende. Sein früherer Braupartner Christopher Chen hat den Betrieb inzwischen verlassen und ist in seine Heimat Australien zurückgekehrt. Dafür ist Van Loons Sohn Jan eingestiegen – und zwar Vollzeit. «Ich bin sehr stolz, dass er den Schritt in die Selbstständigkeit gewagt hat», so Van Loon. Auch der Rest der Familie ist mit an Bord: Jans Partnerin kümmert sich um Grafik und Marketing, Luc Van Loons Frau Anita um die Buchhaltung. «Wir sind ein waschechter Familienbetrieb – und das ist schön so.»

Gemeinsam mit einem Bachelorstudenten der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW erforschen die Van Loons momentan das Potenzial von Weinhefen, die gezielt Aromastoffe im Bier freisetzen sollen. «Unser *Sauvignon Ale*, das letztjährige Siegerbier, enthält zur Unterstützung seines fruchtigen Aromas einen Schuss Traubensaft vom eigenen Rebberg», erklärt Van Loon. «Unser *Vigneron – Cuvée du Patron*, ebenfalls ein prämiertes Bier, schmeckt zwar auch traubig, enthält jedoch keinerlei Früchte. Der Geschmack entsteht allein durch die Hefe. Ihre mikrobiologische Vielfalt birgt enormes Potenzial für neue Bierstile.»

Die Freude am Experimentieren und am wissenschaftlichen Arbeiten hat Luc Van Loon also auch im Ruhestand nicht verlassen. Und seine Bierkreationen bleiben weiterhin auf Erfolgskurs: Bei der diesjährigen «Finest Beer Selection» erreichten gleich zwei Biere aus dem Hause Chen Van Loon beeindruckende 95 von 100 Punkten – ein weiterer Beweis dafür, dass Kunst und Wissenschaft im Glas ausgezeichnet harmonieren. ●



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



Wie werden wir in Zukunft leben? Welche Technologien werden wir nutzen? Wie stellen wir unsere Energieversorgung sicher? Wie bewältigen wir die Klimakrise? Wie treiben wir die Zukunft der Gesundheit voran?

Das PSI ist mit 2300 Mitarbeitenden und einem jährlichen Budget von CHF 450 Millionen das grösste Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften in der Schweiz. Als Teil des ETH-Bereichs ist das PSI ein entscheidender Pfeiler der Schweizer Forschungslandschaft und betreibt Spitzenforschung in den Bereichen Zukunftstechnologien, Energie und Klima, Health Innovation sowie Grundlagen der Natur. Es dient damit der Schweizer Gesellschaft, Wirtschaft und Politik.

Fünf einzigartige Grossforschungsanlagen

Das PSI ist der zentrale Standort der Schweizer Grossforschungsanlagen. Diese stehen der Wissenschaft

wie auch der Industrie zur Verfügung. Rund 3000 Gastforschende sowohl aus der Schweiz als auch aus der ganzen Welt nutzen jährlich die fünf teilchenbeschleunigerbasierten Grossforschungsanlagen des PSI, die in dieser Kombination weltweit einzigartig sind: die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS, der Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL, die Schweizer Myonenquelle μS , die Schweizer Spaltungs-Neutronenquelle SINQ und die Schweizer Forschungsinfrastruktur für Teilchenphysik CHRISP.

Motor für Innovation

Das PSI ist ein wichtiger Arbeitgeber in der Region. Rund ein Viertel der Mitarbeitenden des PSI sind Postdoktorierende, Doktorierende oder Lernende. Damit bringt das PSI hochqualifizierte Fachkräfte für die Wissenschaft und Wirtschaft hervor. Es stärkt die Innovationskraft des Wirtschaftsstandorts Schweiz. Mit der Gründung von Spin-offs transferiert das PSI seine neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse direkt in die Wirtschaft.

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

Erscheint zweimal jährlich.
Ausgabe #2/2025 (September 2025)
ISSN 2504-2262

Herausgeber

Paul Scherrer Institut PSI
Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI
www.psi.ch

Redaktionsteam

Monika Gimmel
Martina Gröschl
Christian Heid
Dr. Laura Hennemann (Ltg.)
Benjamin A. Senn
Dr. Mirjam van Daalen

Art Direction und Design

Studio HübnerBraun

Corporate Design

Scholtysik & Partner AG

Fotos

Paul Scherrer Institut PSI/
Markus Fischer, ausser:
Seite 26/27: unsplash/Jonny James;
Seite 28: Scanderbeg Sauer Photography;
Seiten 29 oben/33 unten: Paul Scherrer
Institut PSI/Mahir Dzambegovic.

Illustrationen und Grafiken

Studio HübnerBraun, ausser:
Seiten 20/21: Daniela Leitner;
Seite 39: Adobe Stock/Garry Killian.

Mehr über das PSI lesen Sie auf:

www.psi.ch

**5232 ist auch auf Englisch und
Französisch erhältlich**

www.psi.ch/en/5232
www.psi.ch/fr/5232

**5232 kann kostenlos abonniert
werden unter**

www.psi.ch/de/5232



In der nächsten Ausgabe: Forschung für gesundes Altern

Dank der Fortschritte in Wissenschaft und Medizin steigt unsere Lebenserwartung – und mit ihr unsere Hoffnung, lange gesund zu bleiben. Also ernähren wir uns etwas bewusster, versuchen uns zum Sport zu motivieren und den Stress zu reduzieren. Wie unterstützt uns die Forschung bei unserem Streben nach hoher Lebensqualität im Alter? Welche neuen Ansätze gibt es bei der Diagnose und Therapie von Krebs, einer der häufigsten altersbedingten Krankheiten? Wie sieht die personalisierte Medizin der Zukunft aus? Was wissen wir über den genauen Aufbau und die Funktionsweise des Gehirns – und wo braucht es heute mehr Grundlagenforschung, damit morgen die bestmöglichen Diagnosen und Behandlungen neurodegenerativer Erkrankungen möglich werden?

Die nächste Ausgabe des 5232 nimmt Sie mit auf die Reise in die heutige Forschung und gibt Ausblicke auf die Zukunft des gesunden Alterns.

5232 – Die Adresse für Forschung

Das Paul Scherrer Institut PSI ist das grösste Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften der Schweiz. 5232 ist die eigene Postleitzahl des Instituts – und der Name des PSI-Magazins. Darin erzählen wir Geschichten aus der Wissenschaft am PSI, berichten von den Menschen, die hier arbeiten, und zeigen, wie aus Forschung Fortschritt entsteht.



5232 Villigen PSI



Paul Scherrer Institut PSI
Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI, Schweiz
www.psi.ch