

# entdeckt

DAS FORSCHUNGSMAGAZIN AUS DEM HZDR

// AUSGABE 02.2014

hzdr.de

## QUANTENWELT

VON ELEKTRONEN, PHOTONEN & CO

### MIT MIKROBEN NACH KUPFER SCHÜRFEN

Internationale Zusammenarbeit im Forschungsprojekt EcoMetals

### GROSSFORSCHUNG IM GRÜNEN

Gesamtheitliche Perspektive auf einen außergewöhnlichen Standort

### STARTSCHUSS FÜR DIE BESTRAHLUNG MIT PROTONEN

Ausbau der Krebsforschung in Dresden

**HZDR**

 **HELMHOLTZ**  
ZENTRUM DRESDEN  
ROSSENDORF

**TITELBILD:** Mit dem Werkzeug des Ionenstrahls – also mit schnellen, elektrisch geladenen Teilchen – gelingen selbstorganisierte Muster und Strukturen, wie sie auch in der Natur vorkommen. Je kleiner diese Nanostrukturen werden, desto mehr werden ihre Eigenschaften durch quantenmechanische Gesetzmäßigkeiten bestimmt. Schema: Sander Münster



## LIEBE LESERINNEN UND LESER,

viele Physikerinnen und Physiker im Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf beschäftigen sich mit Phänomenen, die mit der klassischen Physik, wie wir sie im Schulunterricht kennengelernt haben, nicht zu beschreiben sind. Die von ihnen entdeckten Effekte treten in der Welt des Allerkleinsten – also bei Atomen und deren Bestandteilen oder aber bei Nanostrukturen – auf und gehören in den Bereich der Quantenmechanik. Um einen Blick in diese Welt zu erlauben, die sich oft einem intuitiven Verständnis entzieht, greifen Wissenschaftler wie auch Wissenschaftsjournalisten gerne auf Analogien zurück: Sie vergleichen das exotische Verhalten von Quantenteilchen mit wichtigen Geschossen wie beispielsweise Billardkugeln oder beschreiben das magnetische Moment der Elektronen – den Elektronenspin – als Kreisel.

Diese Art der Vergleiche sprechen das Vorstellungsvermögen an und erleichtern den Zugang zu schwierigen Wissenschaftsthemen, ganz und gar stimmig sind sie nie. Aber eben weil sich der Nanokosmos, soweit wir ihn heute kennen, scheinbar extrem von der uns bekannten Welt unterscheidet, dürfen Vergleiche hinken. Auch klassische Festkörperphysiker greifen auf rhetorische Figuren zurück, wenn sie grundlegende Phänomene in einem Festkörper verdeutlichen wollen.

So vergleicht Stephan Winnerl die Dynamik von Elektronen in Graphen – einem nur aus einer einzigen, zweidimensionalen Lage aus Atomen bestehenden Material – mit dem Umsortieren von Büchern in einem Regal. Bei seinen Untersuchungen mit Laserlicht fand er nämlich heraus, dass sich die Elektronen auf den unterschiedlichen Energieniveaus ungewöhnlich anordnen. Das könnte der erste Schritt hin zu einem neuartigen Landau-Niveau-Laser sein.

Zu den exotischen Effekten in der Quantenwelt gehören auch die Elektronenspins. Sie sind der Fokus mehrerer Arbeitsgruppen am HZDR. Mit ihnen erzeugen Helmut Schultheiß und Sebastian Wintz Wellen und besondere Magnetwirbel. Alina Deac interessiert sich dafür, wie Spins elektrische Ströme beeinflussen und diese dann wiederum auf die Spins zurückwirken. So stoßen die Physiker in neue Dimensionen vor – mit realen Auswirkungen auf die Mikro- und Nanoelektronik. Energieeffiziente und schnelle Speicher- und Kommunikationsprozesse sind ihr Ziel.

Ordnen sich die Elektronenspins unter bestimmten Bedingungen nicht in üblichen Mustern und treten dann neue Phänomene auf? Das untersucht Joachim Wosnitza anhand „frustrierter“ Magnete. Diese verraten etwas über ihr Eigenleben, wenn sie hohen Magnetfeldern oder tiefen Temperaturen ausgesetzt werden. Auch diese Versuche aus der Grundlagenforschung könnten in Zukunft zu bisher ungeahnten Anwendungen führen.

Es gibt eine klare Grenze zwischen klassischer Physik und Quantenmechanik. Realer Raum und Quantenwelt gehen jedoch ineinander über und sind eigentlich eins – die Natur eben. Forschung und Kommunikation über diese komplexen Zusammenhänge werden wohl auch weiterhin an Grenzen stoßen. Die Entdeckungen, die der Nanokosmos bereit hält, sind es wert.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

Christine Bohnet  
Abteilung Kommunikation und Medien im HZDR

# INHALT

## TITEL

Quantenwelt - Von Elektronen, Photonen & Co

- 04 Nano-Muster aus dem Ionenstrahl
- 06 Mikroelektronik: Mit Spins in neue Dimensionen vorstoßen
- 11 Frustrierte Magnete
- 14 Elektronen auf neuem Niveau
- 18 Wenn Silizium besser sehen lernt

## FORSCHUNG

- 20 So richtig nano
- 23 Turbulente Geburtshelfer
- 25 Mit Mikroben nach Kupfer schürfen
- 27 Der Versprödung Grenzen setzen
- 29 Die Tour der Bits und Bytes

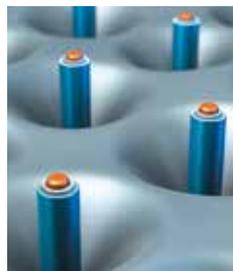
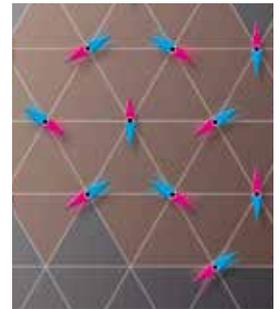
## PORTRÄT

- 33 Erinnerungen an den Herbst 1989
- 34 Großforschung im Grünen
- 36 Über alle Grenzen hinweg

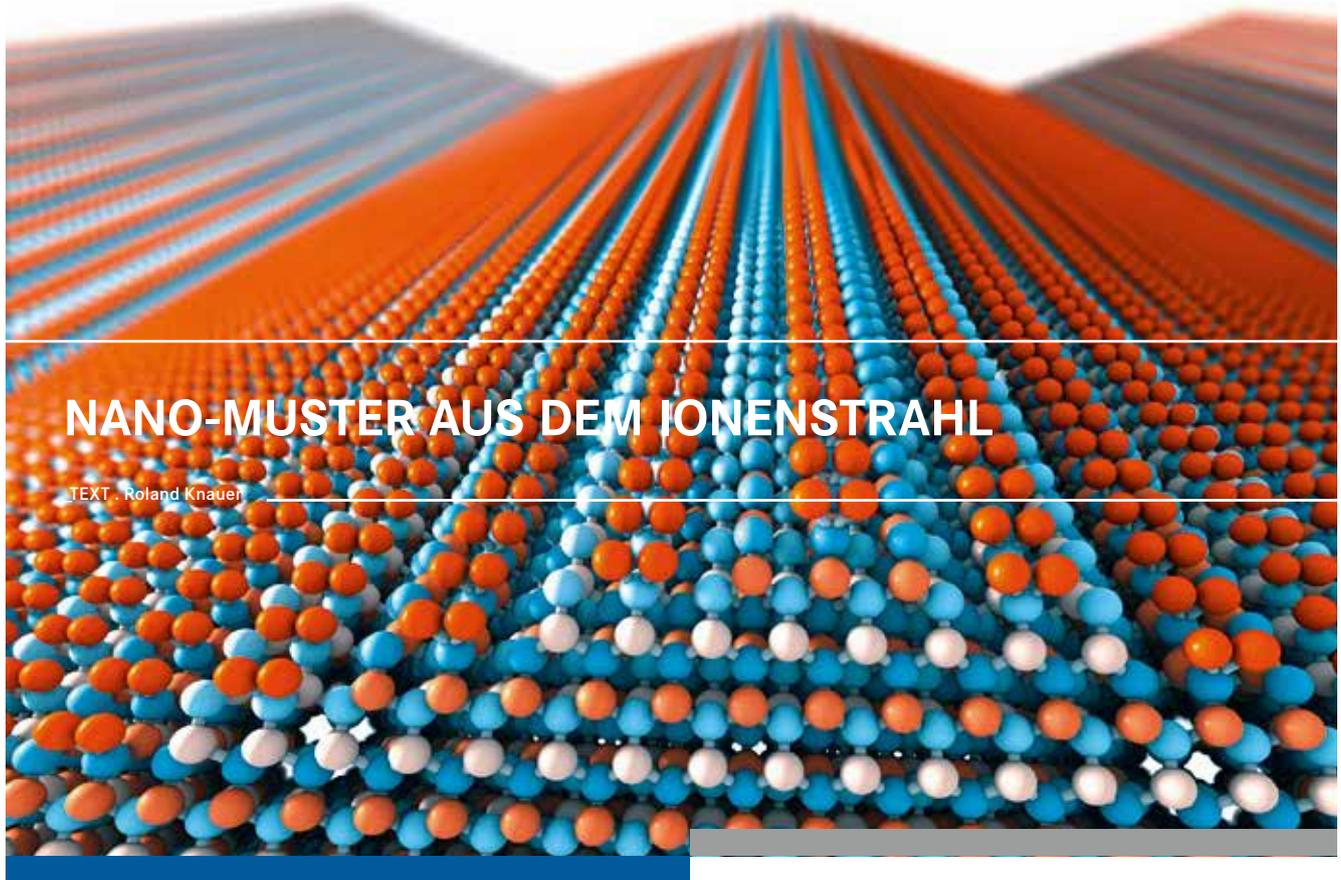
## WISSENSWERT

- 39 Nachwuchs in Dresden
- 39 Sommer am HZDR
- 39 Lötten in den Herbstferien
- 39 Dresden im internationalen Jahr des Lichts
- 40 Startschuss für die Bestrahlung mit Protonen
- 42 IPAC14 gewinnt "Congress Award"
- 42 Internationale Radiochemie-Experten in Dresden
- 42 Radionuklide für die Medizin
- 42 Kerne und Sterne
- 42 Terminvorschau

- 43 Impressum



// Aus Unordnung gleichmäßige Muster schaffen: Wie sich winzige Strukturen auf Halbleitern selbst organisieren.



## NANO-MUSTER AUS DEM IONENSTRAHL

TEXT: Roland Knauer

**GEORDNET:** Nach temperiertem Ionenbeschuss bilden sich selbstorganisierte Strukturen im Nanometer-Bereich.  
Schema: Sander Münster

Wenn Stefan Facsko vom Ionenstrahlzentrum des HZDR die Ergebnisse seiner Experimente zeigt, keimt in einem Beobachter leicht der Verdacht, einem Zauberer auf den Leim zu gehen: Da zielt der Physiker mit einem dicken Strahl von Edelgas-Ionen auf eine Scheibe mit dem Halbleiter-Material Germanium, das zum Beispiel für Detektoren oder als Trägermaterial für Solarzellen verwendet wird. Mit einem Durchmesser von 15 Zentimetern scheint er auf die Zehn-Zentimeter-Scheibe wie mit einer Kanone auf Spatzen zu schießen. Und das auch noch mit einer halben oder ganzen Stunde Dauerfeuer.

Wie mit einem Sandstrahlgebläse fräst er so die Oberfläche des Ziels ab. Und doch entsteht nach dieser eher groben Behandlung auf der Scheibe eine so fein ziselierte und regelmäßige Struktur, dass sie nur in einem Rastertunnel-Mikroskop sichtbar wird. Winzige Löcher in Form von rechteckigen Pyramiden werden in die Oberfläche eingepreßt. Das Ganze passiert allerdings in einer Nano-Welt mit einem Abstand von gerade einmal 60 Nanometern zwischen zwei Pyramiden – das Kopfhair eines Menschen ist 2000-mal dicker.

### Atome wie Billardkugeln

Mit Magie hat das Entstehen dieser Pyramidenmuster natürlich wenig zu tun. Hinter diesen verblüffenden Strukturen stehen eher einfache Gesetze der Physik. „Man kann ein Ion im Strahl mit einer weißen Kugel beim Poolbillard vergleichen“, erklärt Stefan Facsko. Ein Ion schiebt beim Auftreffen ein Atom an der Oberfläche der Scheibe genauso weiter wie die weiße eine farbige Billardkugel. Prallen Kugel oder Atom mit einem Nachbarn zusammen, geben sie die Energie des ersten Stoßes weiter, bis nach einer Kaskade solcher Reaktionen das Ganze wieder zur Ruhe kommt. Nur befinden sich jetzt die Billardkugeln und die Atome an einer anderen Stelle auf dem Tisch oder im Kristall.

Die Ordnung ist dahin und aus den vorher regelmäßig in ihrem Kristallgitter sitzenden Atomen wird nach längerem Ionenbeschuss eine amorphe Masse. Ein Detektor aber funktioniert zwar mit kristallinem Germanium, nicht jedoch mit einer Atom-Mischung, die in einem Ionenstrahl durcheinander gebracht wurde. →

## Geheilte Kristalle

Es gibt durchaus Möglichkeiten, die durch aufprallende Ionen entstandenen Defekte wieder zu heilen. Erhöhen die Forscher die Temperatur deutlich über die normalen Werte im Labor, werden die Atome in ihrem Kristallgitter viel beweglicher. Zwar lösen die Ionentreffer dann immer noch Reaktionskaskaden aus, die eine ganze Reihe von Atomen verschieben. Die agileren Atome aber rutschen danach leichter in eine richtige Kristall-Position und die Struktur heilt wieder.

Die aufprallenden Ionen verschieben nicht nur die getroffenen Atome, sondern schlagen manchmal auch einzelne Atome ganz aus dem Kristall heraus. Das passiert zwar eher selten. Da sehr viele Ionen bis zu einer ganzen Stunde lang auf die Scheibe prasseln, fräst dieser Dauerbeschuss mit der Zeit doch sehr viele Atome weg. Und das in bestimmten Fällen keineswegs gleichmäßig, sondern an manchen Stellen mehr und an anderen weniger, sodass ein Nano-Muster entsteht.

## Inverse Epitaxie

Um das zu erklären, muss der Physiker ein wenig ausholen: Halbleiter werden in einer Epitaxie genannten Technik auf eine Oberfläche aufgedampft. Bei relativ niedrigen Temperaturen aber geschieht das keineswegs gleichmäßig, weil die neu ankommenden Atome häufig auf einer bereits vorher aufgedampften Lage ankommen und zu wenig beweglich sind, um die Stufe zur nächsten, tieferen Atomschicht hinunter zu rutschen. Mit der Zeit bilden sich aus den neu aufgedampften Atomen so immer neue und höhere Stufen, die nach oben immer kleiner werden. So entstehen bei solchen niedrigen Temperaturen lauter kleine Stufenpyramiden, die alle nebeneinander auf der Oberfläche liegen.

„Mit dem Ionenstrahl machen wir im Prinzip genau das Umgekehrte: Wir bauen keine Pyramiden auf, sondern schlagen Atome so heraus, dass in der vorhandenen Schicht ein Loch in der Form einer Pyramide entsteht“, erklärt Stefan Facsko. Das Ganze ist demnach eine umgekehrte oder „inverse Epitaxie“. Der Forscher kann die Temperatur dabei so einstellen, dass sie hoch genug ist, um die Stoßschäden im Kristall wieder auszuheilen, aber noch so niedrig liegt, dass die Atome nicht über die Stufen rutschen können und daher regelmäßige Strukturen entstehen. In dieser Situation fräst der Ionenstrahl Nano-Muster in die Oberfläche, ohne dabei die Kristallstruktur zu zerstören.

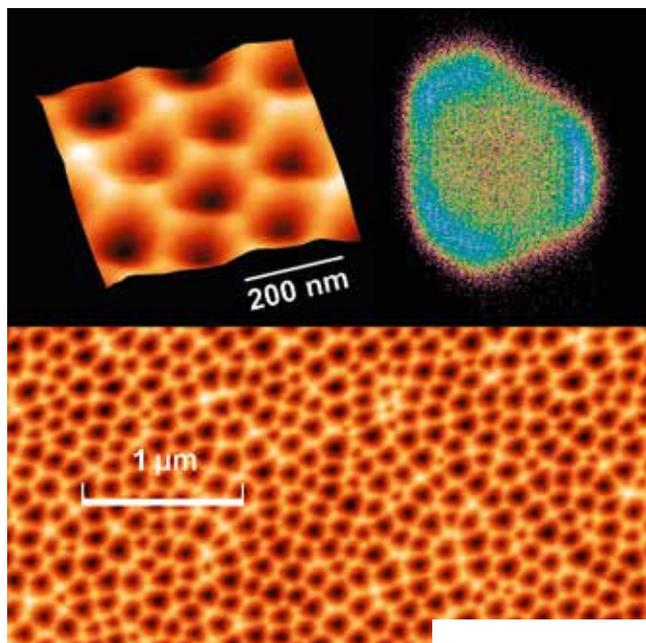
## Neue Symmetrien

Viele Experimente bei unterschiedlichen Temperaturen und aufwendige Berechnungen waren nötig, um einerseits den kristallinen Zustand des Halbleiter-Materials zu erhalten und andererseits wohl-definierte Strukturen im Nano-Maßstab zu erzeugen. Trifft der Strahl aus Argon-Ionen beispielsweise bei Temperaturen von etwas mehr als 260 Grad Celsius auf das Germanium, heilt nicht nur das Kristallgitter wieder aus, sondern bilden sich durch das Abfräsen einzelner Atome auch

regelmäßige Strukturen. Wie bei Sanddünen, über die der Wind bläst, handelt es sich um einen selbstorganisierenden Prozess. Schaut man mit dem Rasterkraft-Mikroskop quasi von oben auf das Ergebnis, so wird man ein wenig an ein Brettspiel erinnert.

Abhängig davon, auf welcher Oberfläche des Kristallgitters die Ionen auftreffen, entstehen zudem unterschiedliche Symmetrien im Halbleiter Germanium. „Dank der inversen Epitaxie konnten wir sogar gänzlich neue Oberflächenmuster erzeugen, die eine dreifache oder sechsfache Symmetrie aufweisen“, berichtet der Physiker. Dampft man zum Beispiel Silber oder eine magnetische Substanz auf diese umgekehrten Pyramiden mit rechteckiger, dreieckiger oder hexagonaler Symmetrie, erhält man Bauelemente mit dem gleichen Nano-Muster, für die es wohl bald eine Reihe neuer Anwendungen geben dürfte. Sicherheitshalber hat Stefan Facsko dafür bereits ein Patent angemeldet. →

NEUE SYMMETRIEN: Oberflächen-Muster in Germanium.



### PUBLIKATION:

X. Ou u. a.: „Reverse epitaxy of Ge: ordered and faceted surface patterns“, in *Physical Review Letters* 2013 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.016101)

### KONTAKT

\_Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung am HZDR  
Dr. Stefan Facsko  
s.facsko@hzdr.de

// Für Magnetismus kann sich Alina Deac begeistern. Denn hinter diesem altbekannten physikalischen Phänomen versteckt sich nicht nur der klassische Kühlschrankschrankmagnet, sondern ein riesiges technologisches Potenzial, das seit mehreren Jahrzehnten immer wieder Türen zu neuen Anwendungen aufstößt. Besonders profitiert dabei die Informations- und Kommunikationstechnik.

## MIKROELEKTRONIK: MIT SPINS IN NEUE DIMENSIONEN VORSTOSSEN

\_TEXT . Uta Bilow

„Fast alle Formen des Magnetismus gehen auf Elektronen zurück“, erklärt die Forscherin, die am HZDR die Nachwuchsgruppe Spintronik leitet. Jedes Elektron hat einen Eigendrehimpuls, den sogenannten Spin. Dieser Spin ist ein Phänomen aus der Quantenphysik, das bei geladenen Teilchen wie dem Elektron zu einem magnetischen Moment führt. Dabei kann der Spin des Elektrons zwei Zustände annehmen und beispielsweise nach oben oder unten zeigen. Jedes Elektron ist somit im Grunde genommen ein kleiner Stabmagnet mit Nord- und Südpol. In Ferromagneten wie Eisen, Nickel oder Kobalt richten benachbarte Elektronen ihre Spins gerne parallel aus. Deshalb verhalten sich diese Metalle ‚ferromagnetisch‘ – und haften an der Kühlschrankschranktür.

In den 1980er Jahren entdeckten Forscher, dass diese magnetischen Momente mit elektrischen Strömen wechselwirken, und stießen dabei auf interessante Effekte, etwa den GMR-Effekt (Giant Magnetoresistance), der die Basis für Leseköpfe heutiger Festplatten darstellt. Damals wurde deutlich, dass hinter solchen magnetischen Effekten ein enormes Anwendungspotenzial steckt, das seitdem ausgelotet wird – auch am HZDR. Alina Deac: „Wenn man die Prinzipien von Magnetismus und Elektronik kombiniert, gelangt man zur Spinelektronik oder Spintronik. Das ist eine völlig neuartige Elektronik, die viele Vorteile gegenüber herkömmlicher Halbleiterelektronik aufweist“.



**MESSUNG:** Der magnetische Widerstand verrät dem Physiker Ciarán Fowley, ob alle Elektronenspins in einer Sandwich-Struktur parallel ausgerichtet sind. Foto: Matthias Rietschel

### Elektronenspins in zwei Zuständen

Die gewöhnliche Halbleiterelektronik basiert auf der Ladung des Elektrons. Fließende beziehungsweise nicht-fließende Elektronen können die Werte „0“ und „1“ einstellen. Aber Elektronen haben eine weitere Eigenschaft, die von herkömmlichen elektronischen Bauelementen nicht genutzt wird: den Spin. Elektronenspins mit ihren zwei möglichen Orientierungen eignen sich ebenfalls zur Darstellung zweier verschiedener Zustände. Wenn in der Halbleiterelektronik auch der Freiheitsgrad des Elektronenspins genutzt werden kann, dann ermöglicht dies eine Entwicklung von Bauelementen mit ganz neuen, ungeahnten Möglichkeiten. Denkbar sind leistungsfähigere und zugleich deutlich energieeffizientere Handys und Smartphones, dreidimensionale Kommunikationssysteme oder auch medizinische Applikationen, etwa Sensoren, die bei gefährdeten Personen bestimmte Körperfunktionen überwachen.

Alina Deac erklärt das Zusammenspiel von fließenden Elektronen und Spins: „Bei einem normalen Strom, der zum Beispiel durch ein Kupferkabel fließt, sind die Spins willkürlich orientiert. Anders ist das jedoch bei magnetischen Materialien, die selbst geordnete Spins aufweisen. Fließt dort ein Strom hindurch, richten sich die Elektronenspins an der Nord-Süd-Achse des Magneten aus.“ Die Folge: Man erhält einen spin-polarisierten Strom. Und umgekehrt kann man mit einem spin-polarisierten, elektrischen Strom die Magnetisierung eines Ferromagneten beeinflussen. „Das ist der Spin-Transfer-Torque-Effekt“, sagt die Physikerin, „der Strom übt ein Drehmoment auf die Magnetisierung aus.“ Dieser Effekt erlaubt daher die gezielte Manipulation der Magnetisierung.

### Strom sparende MRAM-Speicher

Mit ihrer sechsköpfigen Arbeitsgruppe am HZDR erforscht Alina Deac mehrere Anwendungsmöglichkeiten dieses Spin-Transfer-Torque-Effekts. „Wir schauen, ob sich dieser Effekt als Schreibmechanismus für MRAM-Speicher eignet, also für sehr schnelle, permanente magnetische Datenspeicher.“ MRAM-Arbeitsspeicher (MRAM steht für Magnetoresistive Random-Access Memory) werden seit den 1990 Jahren entwickelt. Es handelt sich um magnetische Datenspeicher, →

**WIDERSTAND:** Ewa Kowalska, Doktorandin in der Nachwuchsgruppe Alina Deacs, bei der Untersuchung von Spin-Torque-Oszillatoren. Foto: Matthias Rietschel





**LICHTSTAHL TRIFFT PROBE:** Mit dem Brillouin-Lichtstreu-Mikroskop können Kai Wagner, Thomas Sebastian und Helmut Schultheiß (v.l.) dynamische Prozesse in Festkörpern beobachten. Foto: Matthias Rietschel

die hohe Schaltgeschwindigkeiten aufweisen, dabei aber nur wenig Energie verbrauchen und entsprechend wenig Wärme entwickeln. Gewöhnliche Speicher packen die Informationen in Ladungspakete und müssen die Informationen häufig lesen und neu schreiben, um Datenverlust vorzubeugen. Das kostet Zeit und vor allem viel Energie. Und noch ein Pluspunkt: MRAMs speichern die eingespeisten Informationen auch noch nach Abschalten des Stroms. Würde man PCs und Mobiltelefone also mit MRAM-Arbeitsspeichern ausrüsten, entfielen die lästige Wartezeit nach dem Start, in der sich die Geräte erst einmal alle Informationen in den Arbeitsspeicher laden. Allerdings sind MRAMs bislang nur in Nischen vertreten, weil sich die Bits nicht so dicht schreiben lassen.

Die kleinste Einheit eines MRAM, eine Speicherzelle, hat eine Sandwich-Struktur. Sie besteht aus zwei ferromagnetischen Schichten, zwischen denen eine sehr dünne Trennschicht liegt. Die Unterseite der Zelle bildet ein sogenanntes harter Ferromagnet, dessen Magnetisierung fest ist – die Spins sind immer gleich ausgerichtet. Die Oberseite ist hingegen ein weicher Ferromagnet, bei dem die Richtung der Magnetisierung verändert werden kann. Sind die Spins in Ober- und Unterseite des Sandwichs parallel ausgerichtet, ist der Widerstand der Zelle gering. Gegensätzlich orientierte Spins bedeuten dagegen einen hohen Widerstand. Jede Speicherzelle kann somit zwei eindeutig unterscheidbare Zustände einnehmen – das Grundprinzip eines Bit. Um ein MRAM-Bit zu schreiben,

schickt man Strompulse zu der Zelle, die ein Magnetfeld erzeugen und die Spins der weichen Schicht beeinflussen. Dieser Vorgang begrenzt die Integrationsdichte eines MRAM-Speichers: Packt man die Zellen zu dicht, beeinflusst das schreibende Magnetfeld auch die Nachbarzellen. Alina Deac ist überzeugt: „Wenn man die Bits mit spin-polarisierten Strömen schreibt statt mit einem äußeren magnetischen Feld, kann man viel höhere Packungsdichten erreichen.“ Dann könnten die MRAM-Speicher in breite Anwendungsfelder vordringen.

Ein weiteres Gebiet, das durch den Spin-Transfer-Torque-Effekt Fortschritte erfahren könnte, ist die drahtlose Kommunikation. Denn mit einem spin-polarisierten Strom kann man die weiche Schicht eines Sandwichs auch zum Oszillieren bringen: Die Orientierung der Spins schwingt dann im raschen Wechsel hin und her. Der Widerstand des Bauteils ändert sich periodisch und erzeugt auf diese Weise ein Hochfrequenzsignal, dessen Frequenz durchstimmbare ist. Solche Spin-Torque-Oszillatoren sind beispielsweise geeignet für Mobiltelefone, die nicht auf einem festen Kanal senden, sondern sich innerhalb eines Frequenzbandes einen freien Kanal suchen. Die verfügbaren Netze ließen sich so wesentlich besser nutzen.

## Spinwellen für hohe Frequenzen

Die Spintronik ist bereits dabei, die Informations- und Kommunikationstechnik voranzubringen und neue Anwendungsmöglichkeiten zu eröffnen. Bei der konsequenten Nutzung des Elektronenspins als Träger von Informationen ergeben sich jedoch noch weitere Möglichkeiten. Helmut Schultheiß, der seit 2013 am HZDR eine Emmy Noether-Nachwuchsgruppe leitet, beschäftigt sich beispielsweise mit Spinwellen. Der Clou bei diesem Ansatz: Elektronen und ihre Spins bewegen sich nicht mehr. Stattdessen regt man die Spins eines Ferromagneten →

so an, dass sie eine Welle bilden. Mithilfe solcher Wellen, auch Magnonen genannt, kann Information genauso transportiert werden wie mit fließenden Ladungsträgern. Allerdings ist das Verfahren deutlich schneller und verbraucht viel weniger Strom. „Die Magnonik erlaubt eine besonders schnelle Signalverarbeitung“, betont Schultheiß, „wir erreichen damit Frequenzen bis in den Terahertz-Bereich!“

Mit Hilfe der Spinwellen will der Pfälzer ein großes Problem in der Informations- und Kommunikationstechnik angehen: die Hitzeentwicklung von Chips. Moderne Prozessoren müssen immer mehr Daten verarbeiten, deshalb nimmt ihre Frequenz stetig zu, oder es werden mehrkernige Prozessoren verbaut. Dadurch entsteht aber eine große Menge an Abwärme, die mit Lüftern aus dem Computer abgeführt werden muss. „Die elektronische Datenverarbeitung stößt hier langsam an ihre Grenzen“, erläutert Helmut Schultheiß. „Die Leistungsdichte eines 486-Prozessors war ähnlich wie bei einer Kochplatte. Heutige Prozessoren sind schon eher mit der Sonnenoberfläche vergleichbar!“

Spinwellen sollen helfen, diese Schwierigkeiten zu umgehen. „Wellen können zum einen Energie transportieren“, sagt der Forscher, „man könnte damit Hitze ableiten.“ Ebenso lassen sich Spinwellen aber auch nutzen, um Informationen zu verarbeiten und Logikbausteine zu erzeugen. Magnonen können sich – wie Wasser- oder Lichtwellen – ausbreiten und dabei miteinander wechselwirken, sich zum Beispiel auslösen oder verstärken. „Wir haben auch schon gezeigt, dass man mit Spinwellen einen Schalter realisieren kann“, berichtet Schultheiß. Mit seiner Arbeitsgruppe hat er untersucht, wie sich Spinwellen ausbreiten. Das Ergebnis: Mit einem äußeren Magnetfeld kann man beeinflussen, welchen Weg die Spinwellen an einer Verzweigung nehmen. Beobachten können die Wissenschaftler das mit einem speziellen Apparat, einem sogenannten Brillouin-Lichtstreu-Mikroskop.

Am Dresdner Helmholtz-Zentrum untersuchen Schultheiß und seine Kollegen außerdem verschiedene Wege, um Spinwellen anzuregen. Dabei experimentieren sie mit einer Nickel-Eisen-Legierung und nutzen zum Beispiel Mikrowellen. „Die Mikrowellenfelder koppeln an die Eigenfrequenzen der Spins im Material an und rufen so eine Spinwelle hervor“, erklärt der Nachwuchsgruppenleiter. Auch über den Spin-Transfer-Torque-Effekt können Magnonen erzeugt werden.

## Eine Brücke zwischen Photonik und Elektronik

In weiteren Versuchen wollen die HZDR-Wissenschaftler untersuchen, ob sich Spinwellen mit Licht anregen lassen – und in Umkehrung dazu, wie man mithilfe von Magnonen Licht manipulieren kann. „Das wäre eine neue Technologie als Brücke zwischen Photonik und Elektronik“, bekräftigt Schultheiß. Hier sieht er dringenden Bedarf. Denn an der Schnittstelle zwischen Datenverarbeitung über Elektronik und Kommunikation über Laser und Glasfaserkabel besteht ein Engpass, da die Frequenzen und Wellenlängen sich stark unterscheiden. „Mithilfe von Spinwellen können wir Photonen kontrollieren und steuern.“ →



MITTENDRIN: Zur Erforschung von statischen und dynamischen magnetischen Eigenschaften untersuchen Forscher an diesem Gerät die sogenannte ferromagnetische Resonanz. Foto: Oliver Killig

Wenige Bürotüren weiter sitzt sein Kollege Sebastian Wintz, der im vergangenen Frühjahr seine Doktorarbeit am HZDR abgeschlossen hat. Auch Wintz beschäftigt sich mit der Orientierung von Spins in magnetischen Materialien, und dabei ist er auf interessante Phänomene gestoßen. „In sehr dünnen Schichten eines ferromagnetischen Materials nehmen die Spins eine besondere Orientierung ein. Sie minimieren ihr Streufeld, indem sie kleine Wirbel bilden“, erklärt der Physiker. Unter einem speziellen Mikroskop kann man erkennen, dass sich die Spins der Elektronen in einer nur wenige Mikrometer dünnen Schicht einer Nickel-Eisen-Legierung so ausrichten, dass sie lauter kleine Wirbel formen. Innerhalb eines Wirbels richten sich die magnetischen Momente aneinander aus und die Orientierung der Spins läuft einmal im Kreis herum. Lediglich in der Mitte des Wirbels richtet sich die Magnetisierung aus der Ebene des Wirbels heraus und zeigt nach oben oder unten.

### Magnet-Wirbel senden Spinwellen aus

Diese Wirbel kann man zum Schwingen anregen, wenn man einen Strom durch das Material schickt. Die Mitte des Wirbels beginnt dann zu kreiseln und es entsteht elektromagnetische Strahlung im Gigahertz-Bereich – dem Frequenzbereich, der für Mobilfunk oder WLAN genutzt wird. Theoretisch könnte

man so also Antennen für die drahtlose Datenübertragung konstruieren. Doch Sebastian Wintz hat noch mehr herausgefunden: „Wir haben auch Sandwich-Strukturen hergestellt, mit einer dünnen Lage aus Ruthenium als Trennschicht zwischen zwei ferromagnetischen Lagen. Da gibt es dann Doppelwirbel.“ Der Orientierungssinn in der oberen und unteren Schicht kann dabei gleichartig oder gegenläufig sein, das hängt von den Schichtdicken ab. Das Beste aber ist: Bei höheren Frequenzen beginnen die Doppelwirbel, Spinwellen anzuregen. „Wenn wir Mikrowellen einstrahlen, beobachten wir eine Kreiselbewegung“, sagt Wintz. „Es entstehen Spinwellen, die von der Wirbelmitte nach außen abgestrahlt werden.“ Er zeigt Filme, die er an einem Röntgen-Transmissionsmikroskop am Helmholtz-Zentrum Berlin aufgenommen hat. In den stark verlangsamten Sequenzen kann man verfolgen, wie die Spinwellen abgestrahlt werden. Die Frequenzen liegen im Gigahertz-Bereich und ändern sich je nach Anregungsfrequenz der Mikrowellen.

All diese Ergebnisse machen deutlich: Die Spintronik ist ein rasant wachsendes Forschungsgebiet und bietet faszinierende Perspektiven – sowohl für die Grundlagenforschung als auch für mögliche Anwendungen. —

#### PUBLIKATIONEN:

C. Fowley u. a.: "Zero-field spin-transfer oscillators combining in-plane and out-of-plane magnetized layers", in Applied Physics Express 2014 (DOI: 10.7567/APEX.7.043001)

K. Vogt u. a.: "Realization of a spin-wave multiplexer", in Nature Communications 2014 (DOI: 10.1038/ncomms4727)

S. Wintz u. a.: "Topology and origin of effective spin meron pairs in ferromagnetic multilayer elements", in Physical Review Letters 2013 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.177201)

**MIKROWELLEN:** Doktorand Manuel Langer befestigt eine ferromagnetische Probe, um mit Hilfe von Mikrowellen Spinwellen darin zu erzeugen. Foto: Matthias Rietschel



#### KONTAKT

\_Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung am HZDR

Dr. Alina Deac  
a.deac@hzdr.de

Dr. Helmut Schultheiß  
h.schultheiss@hzdr.de

Dr. Sebastian Wintz  
s.wintz@hzdr.de

// Physiker am Hochfeld-Magnetlabor Dresden des HZDR untersuchen die nicht erfüllten Bedürfnisse von Atomen.

## FRUSTRIERTE MAGNETE

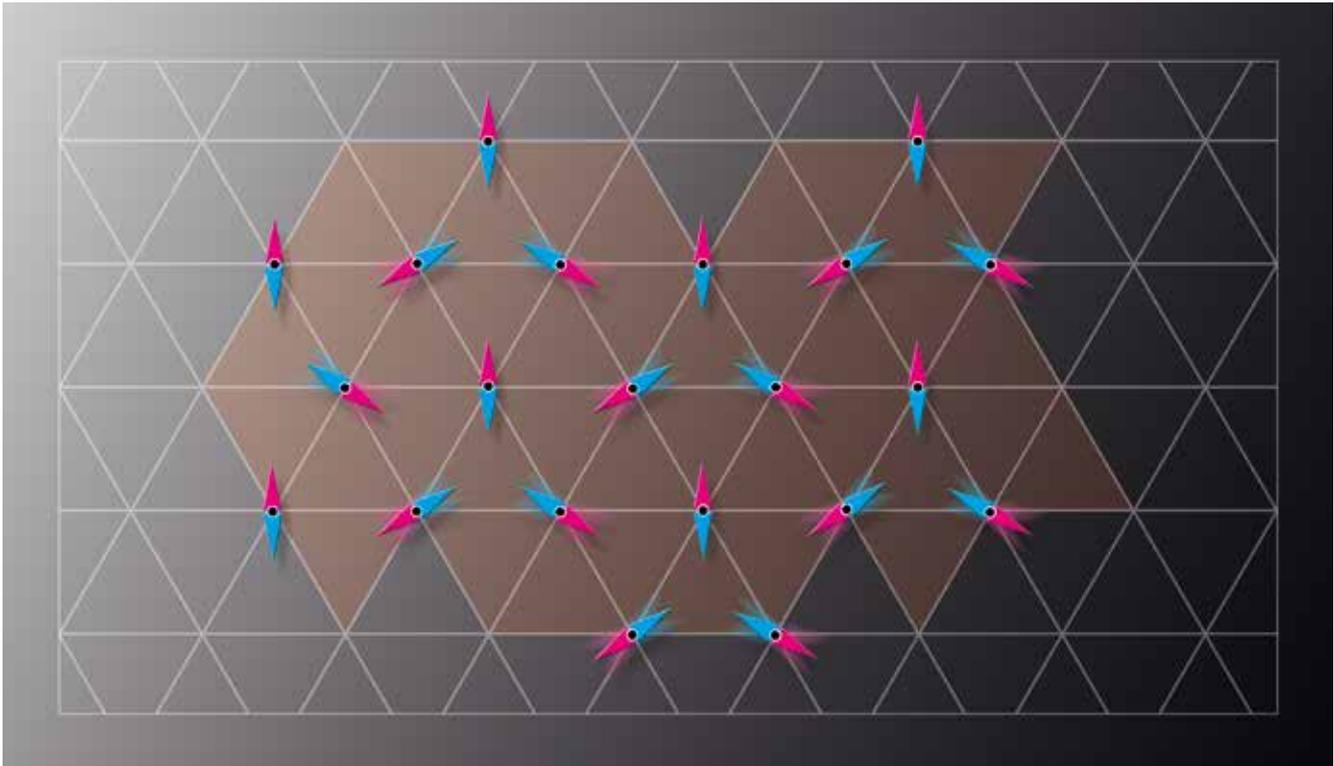
\_TEXT . Roland Knauer



**HANDARBEIT:** Christian Rückert, Techniker am Hochfeld-Magnetlabor Dresden, bei Arbeiten an einer Magnetspule.  
Foto: Oliver Killig

Wenn der Experimentalphysiker Joachim Wosnitza vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf von „Frustration“ spricht, denkt er normalerweise nicht an die auf seinem Schreibtisch wartenden Berge von Papierkram, sondern eher an sein Forschungsgebiet, den Magnetismus. Dieser entsteht schließlich aus dem Zusammenspiel unvorstellbar vieler, unvorstellbar kleiner Elementar-Magnete. Ähnlich wie Menschen mehr oder weniger drängende Wünsche haben, kennen auch diese Minimagnete solche Bedürfnisse. Hat ein Mensch starken Hunger, findet aber nichts Essbares, ist er ziemlich frustriert. Nicht viel anders geht es einem Elementar-Magneten, der seine Bedürfnisse nicht erfüllen kann.

Elektromagnetismus wiederum ist in der Natur eine der vier zentralen Kräfte, die im Großen und im Kleinen die Welt formen, im riesigen Weltraum genau wie im Bereich der winzigen Atome. Wer verstehen will, wie diese Welt funktioniert, sollte also die Frustration der Elementar-Magnete nicht aus den Augen verlieren. Genau das tut Joachim Wosnitza gemeinsam mit seinen Dresdner Kollegen Roderich Moessner vom Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme und Matthias Vojta von der Technischen Universität im Rahmen eines Sonderforschungsbereiches, der im November 2014 gegründet wurde. →



**FRUSTRIERT:** Die Spins von Elektronen – hier dargestellt durch Kompassnadeln – streben oft danach, sich entgegengesetzt zum Nachbarspin auszurichten. Für bestimmte Spin-Anordnungen ist dies nicht immer möglich, sodass es zu frustrierten Zuständen kommt.

## Elektrische Ladungen in Bewegung

Wie Magnetismus entstehen kann und wie er mit elektrischen Strömen zusammenhängt, ist seit beinahe zwei Jahrhunderten bekannt: Bewegen sich elektrische Ladungen, erzeugen sie ein Magnetfeld, das seinerseits die elektrischen Ladungen beeinflusst. Als vor allem im 20. Jahrhundert Physiker den Aufbau von Atomen und deren Zusammenhalt aufgeschlüsselt haben, zeigte sich auch dort die wichtige Rolle dieses Elektromagnetismus. Atome sind nichts anderes als elektrisch positiv geladene Kerne, um die in relativ großer Entfernung die viel kleineren und elektrisch negativ geladenen Elektronen sausen.

Den Magnetismus eines solchen Elektrons kann man sich wiederum als winzigen Stromkreis veranschaulichen, den Physiker „Spin“ nennen. Für einen solchen Kreisverkehr gibt es genau zwei Möglichkeiten, entweder rechtsherum im Uhrzeigersinn oder in die entgegengesetzte Richtung, also links herum. In ihrer Formelsprache stellen Physiker diese beiden Richtungen als Pfeil dar, der entweder nach oben oder nach unten zeigt. Oft tun sich in der Natur zwei entgegengerichtete Spins zu Paaren zusammen.

## Frustration

Sehr oft passiert das innerhalb eines Atoms. Allerdings ist das nicht immer möglich. Besitzt ein Atom zum Beispiel eine Hülle aus einer ungeraden Anzahl von Elektronen, bleibt zwangsläufig eines übrig, das keinen Partner gefunden hat. Vielleicht

kann man ja seinen eigenen Spin ohne Partner bei einem benachbarten Atom ausgleichen, das ebenfalls einen solchen partnerlosen Spin hat? So können in einer langen Kette aus Atomen die Spins zum Beispiel abwechselnd nach oben und nach unten gerichtet sein. Damit ist das Problem nur in einer Raumdimension gelöst. In der dreidimensionalen Welt hingegen liegen in der Nachbarschaft neben dieser Kette, aber auch ober- und unterhalb oder schräg darüber und darunter noch mehr Ketten. Dahinter gibt es weitere Atom-Reihen und rasch wird klar, dass die Atome in bestimmten Anordnungen kaum eine Position finden können, in der alle Nachbarn einen Spin in der entgegengesetzten Richtung wie der eigene haben. Das häufige Grundbedürfnis, einen anderen Spin als jeder Nachbar zu haben, lässt sich also kaum erfüllen – genau wie bei Menschen sind auch die betroffenen Atome frustriert.

„Diese Frustration entsteht bereits in einem Dreieck mit einem Spin an jeder Ecke“, nennt Joachim Wosnitza ein einfaches Beispiel. Zeigt der Spin an der oberen Spitze nach unten, sollte der Spin an der Ecke links unten also nach oben zeigen, um die Balance zu wahren. Was aber macht der Spin rechts unten in dieser Situation? Zeigt er nach oben, klappt es hervorragend mit dem Spin oben, allerdings überhaupt nicht mit dem Nachbarn zur Linken. Bildet er dagegen mit diesem linken Nachbarn ein Paar, kommt er mit dem Kollegen an der Spitze oben in Schwierigkeiten. Das ist eine typische Situation für Frustration. „Wir fragen uns nun, ob die Frustration der Atome so groß ist, dass die Spins selbst bei tiefsten Temperaturen keine neue Ordnung ausbilden und so neuartige Phänomene auftreten“, erklärt Joachim Wosnitza. →

## Tiefgekühlte Magnete

Um dies zu beobachten, kühlen die Forscher ihre Proben mit flüssigem Helium extrem herunter. Die gleiche Kühlung hält zum Beispiel auch die supraleitenden Spulen in Magnetresonanztomographie-Geräten in Krankenhäusern kalt. Die HZDR-Physiker aber kühlen noch weiter ab, indem sie das Heliumgas über der Flüssigkeit abpumpen. Dadurch liegen die Temperaturen gerade einmal 1,5 Grad über dem tiefst möglichen Wert von minus 273,15 Grad Celsius. Dann sind die Atome praktisch eingefroren und die Forscher können die Frustration gut analysieren.

Untersuchen die Forscher Materialien mit magnetischen Atomen auf den Ecken einer winzigen Pyramide, die aus vier gleichseitigen Dreiecken besteht und die deshalb „Tetraeder“ genannt wird, entdecken sie dort ebenfalls Frustration. Die Spins an den vier Ecken gehen dann oft einen Kompromiss ein, bei dem zwei von ihnen in den Tetraeder hinein gerichtet sind und die anderen beiden heraus. Bestimmte Kristalle bestehen aus lauter solchen Tetraedern, die allerdings aus vielen unterschiedlichen Atomen aufgebaut sind. Die bekannteste Verbindung mit einem solchen Aufbau ist sicher Wassereis, in dem jedes Sauerstoff-Atom in einem Tetraeder aus vier Wasserstoff-Atomen sitzt, von denen je zwei eine enge Verbindung mit einem anderen Sauerstoff-Atom halten und die anderen beiden weiter entfernt sind.

## Monopole

Bestehen solche Kristalle zum Beispiel aus dem chemischen Element Dysprosium und den nicht magnetischen Atomen Titan und Sauerstoff, sind die Spins normalerweise an zwei Ecken eines jeden Tetraeders nach innen und an den beiden

anderen Ecken nach außen gerichtet. Die Forscher nennen diesen Zustand „Spin-Eis“, weil seine magnetische Struktur der räumlichen Anordnung von Wassereis ähnelt. Legen Forscher an solche Verbindungen Magnetfelder an, können sie einzelne Spins so umklappen, dass in einem Tetraeder nun drei in die eine und nur noch der vierte in die entgegengesetzte Richtung schaut. Diese Anregung kann relativ leicht durch die Kette der benachbarten Tetraeder wandern und ähnelt einem Magneten, der nur einen Pol hat. Dabei verhalten sie sich wie die lange gesuchten magnetischen „Monopole“, die entweder einen magnetischen Nord- oder einen magnetischen Südpol haben. Solche Monopole können die Forscher nur in Festkörpern beobachten. Wird das Magnetfeld abgeschaltet, verschwinden die Monopole nach kurzer Zeit wieder und der Spin-Eis-Zustand entsteht neu.

Legen Joachim Wosnitza und sein Team an eine andere Verbindung, dem Chromit (auch Chromeisenstein genannt), in dem Eisen durch Kobalt ersetzt wurde, sehr starke Magnetfelder von rund 40 Tesla an, verschwindet die ursprünglich vorhandene Frustration der magnetischen Atome auf den Tetraedern. Die Forscher vermuten, dass sich in diesem Fall der Kristallzustand verändert und die Atome in eine günstigere Position rutschen. Ohne äußere Magnetfelder ist die Frustration dagegen so stark, dass der Kristall sich räumlich verzerrt und so doch noch eine magnetische Ordnung ohne Frustration entsteht.

## Ein Weg zum Quantencomputer

Mit solchen Frustrationsversuchen tasten sich die Forscher ein wenig weiter an die Grundlagen des Magnetismus heran. Und sehen am fernen Horizont sogar eine mögliche technische Anwendung: „Solche topologischen Zustände wie die magnetischen Monopole könnten für den Weg zu einem Quantencomputer vielleicht eine wichtige Bedeutung erlangen“, überlegt Joachim Wosnitza. Aber auch in Hochtemperatur-Supraleitern spielen solche magnetischen Strukturen offensichtlich eine entscheidende Rolle. Diese Verbindungen benötigen, anders als die meisten Supraleiter, keine extrem tiefen Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunktes, um elektrischen Strom praktisch ohne Verluste weiterzuleiten. Kein Wunder, wenn Frustrationsforschung derzeit einen Boom erlebt. —

### PUBLIKATION:

V. Tsurkan, S. Zherlitsyn u.a.: „Unconventional magnetostructural transition in  $\text{CoCr}_2\text{O}_4$  at high magnetic fields“, in Physical Review Letters 2013 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.115502)

**KONTROLLE:** Elizabeth Green unterstützt als Physikerin die Messgäste bei deren Experimenten in hohen Magnetfeldern. Foto: Oliver Killig



### KONTAKT

\_Institut Hochfeld-Magnetlabor Dresden am HZDR  
Prof. Joachim Wosnitza  
j.wosnitza@hzdr.de

// Der Physiker Stephan Winnerl hat ein scheinbar paradoxes Phänomen im Material Graphen entdeckt. Wenn ein Magnetfeld auf den „Wunderstoff“ wirkt, verschwinden Elektronen genau aus dem Energie-Niveau, das eigentlich stets mit neuen angeregten Teilchen versorgt wird.



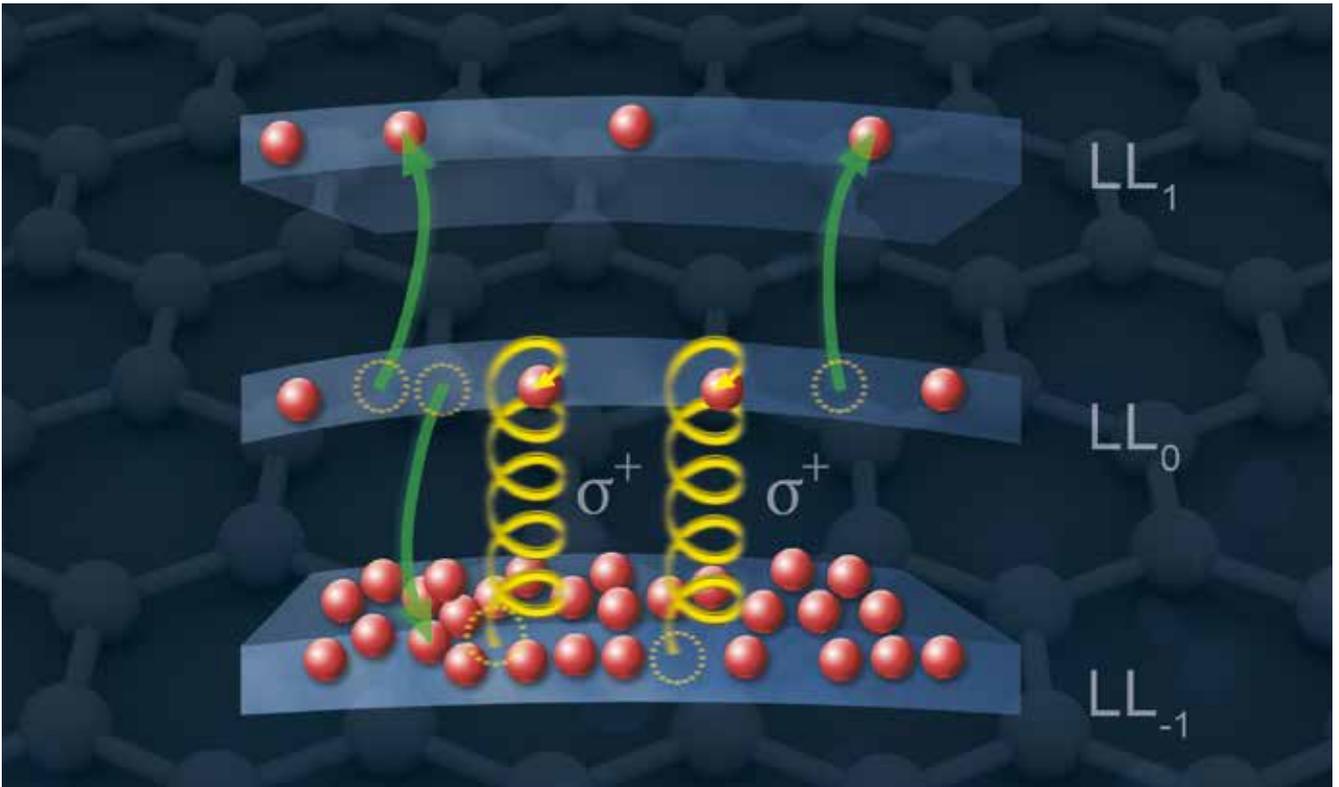
**FEINARBEIT:** Physiker Wolfgang Seidel überprüft die optische Strahlführung in der Spiegelkammer des Freie-Elektronen-Lasers. Foto: Frank Bierstedt

## ELEKTRONEN AUF NEUEM NIVEAU

\_TEXT . Christian Döring

„Jede hinreichend fortschrittliche Technologie ist von Magie nicht zu unterscheiden.“ So lautet ein berühmter Satz des britischen Science Fiction-Autors und Physikers Arthur C. Clarke. Auf kaum ein anderes Material trifft das Clarkesche Gesetz so gut zu wie auf Graphen: Es ist reißfester als Stahl und leitet Strom und Wärme besser als Kupfer. Als zweidimensionale Schicht, die nur aus einer Lage Kohlenstoff-Atomen besteht, ist es aber zugleich auch flexibel, fast durchsichtig und rund eine Million Mal dünner als ein Blatt Papier. Hergestellt werden kann es mit Klebestreifen und sogar mit einem Küchenmixer.

Immer für eine Überraschung gut und einfach zu produzieren – so rückte das Material schnell in den Fokus intensiver Forschung. Schon kurz nach seiner Entdeckung vor zehn Jahren erkannten Wissenschaftler, dass sich die Energiezustände von Graphen im Magnetfeld – die sogenannten Landau-Niveaus – deutlich anders verhalten als beispielsweise in Halbleitern. Stephan Winnerl führt schon seit längerer Zeit optische Experimente mit Graphen und vergleichbaren Materialien durch, doch erst jetzt konnte er das sonderbare Verhalten der Teilchen klären, die für die physikalischen Eigenschaften von Graphen verantwortlich sind. →



**NIVEAUWECHSEL:** Obwohl die HZDR-Physiker die Elektronen im Graphen mit Terahertz-Strahlung (gelbe Spiralpfeile) auf ein bestimmtes Energieniveau (LL0) anregen, sorgen Stoßprozesse zwischen den Teilchen für eine Umverteilung auf die Landau-Niveaus LL-1 und LL1.

### Laserpulse regen an und fragen ab

„In den letzten Jahren wurden viele faszinierende elektrische und optische Effekte von Graphen in Magnetfeldern entdeckt, aber die Dynamik von Elektronen hat bislang niemand in einem solchen System untersucht“, so der Physiker vom Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung am HZDR. „Wir haben uns gefragt, wie sich Elektronen im Graphen verteilen, welche Mechanismen dafür verantwortlich sind und auf welchen Zeit- und Energieskalen die Prozesse stattfinden“, erläutert Stephan Winnerl und betont zudem die sorgfältige Arbeit des HZDR-Doktoranden Martin Mittendorff, der Erstautor des „Papers“ ist.

Mit seinen Kollegen setzte Winnerl das Graphen einem vier Tesla starken Magnetfeld aus. Damit ist das Feld zwar 40 Mal stärker als ein herkömmlicher Hufeisenmagnet, aber noch immer weit entfernt von den über 90 Tesla starken Rekord-Magnetfeldern, welche die HZDR-Kollegen vom Hochfeld-Magnetlabor Dresden nutzen. Es genügt aber bereits, um Elektronen im Graphen dazu zu bringen, nur noch ganz bestimmte Energiezustände einzunehmen. Mit dem Magneten werden die Elektronen also gewissermaßen auf Bahnen gezwungen. Diese Landau-Niveaus wurden dann mit „spiralförmigen“ Lichtpulsen des Freielektronen-Lasers am Zentrum untersucht. „So ein zirkular polarisierter Laserpuls im Terahertz-Bereich regt die Elektronen auf ein bestimmtes Energieniveau an. Ein zeitlich versetzter Puls fragt dann ab, wie sich das System entwickelt. Das nennt sich deshalb auch Anregung-Abfrage-Experiment“, erklärt Winnerl.

### Umsortierung der Elektronen überrascht Wissenschaftler

Das Ergebnis der Versuche verblüffte die Wissenschaftler. Nach und nach leerte sich ausgerechnet das Energieniveau, in welches per Laser stets neue Elektronen gepumpt wurden. Den paradox wirkenden Effekt veranschaulicht Winnerl an einem Alltagsbeispiel: „Man stelle sich vor, eine Bibliothekarin

#### Terahertz-Strahlung

**Terahertz-Strahlung ist Licht, dessen Wellenlänge im elektromagnetischen Spektrum genau zwischen Infrarotlicht und der Mikrowellenstrahlung liegt. Bekannt wurde die Strahlung vor allem durch den Einsatz in sogenannten „Nacktschannern“ an Flughäfen. Terahertz-Pulse werden in der Materialforschung genutzt, um durch systematische Anregung und Abfrage die Dynamik von Elektronen und anderen Ladungsträgern zu untersuchen.**

**Graphen besitzt die Fähigkeit, Strahlung niedriger Energien wie Terahertz- und Infrarotlicht zu absorbieren, sodass es sich bestens als Material für Detektoren eignet.**





**RENNSTRECKE:** Mit den intensiven Lichtblitzen der beiden Freie-Elektronen-Laser am ELBE-Zentrum für Hochleistungs-Strahlenquellen des HZDR können Forscher aus aller Welt Materialzustände auf atomarer Ebene untersuchen.

Foto: Frank Bierstedt

sortiert Bücher in einem Regal mit drei Böden um. Sie stellt dazu jeweils ein Buch vom unteren Boden in den mittleren. Gleichzeitig ‚hilft‘ ihr Sohn mit, indem er immer zwei Bücher aus der Mitte nimmt und eins davon in den oberen, das andere in den unteren Boden stellt. Der Junge macht das so eifrig, dass die Anzahl der Bücher im mittleren Boden abnimmt, obwohl seine Mutter ja gerade diesen Boden neu füllen möchte.“

dabei auf das niedrigste Landau-Niveau zurück und geben beim Übergang zudem Energie ab. Die wird wiederum auf ein anderes Elektron übertragen, wodurch es auf ein höheres Niveau steigt. „Dieser Effekt ist als Auger-Streuung schon länger bekannt, doch niemand hätte erwartet, dass er so stark ist und ein Energieniveau immer leerer räumt“, erläutert Winnerl.

Nachdem sich das grundlegende Modell in den Experimenten bewährt hatte, folgte an der Technischen Universität Berlin die theoretische Feinarbeit. Die Berliner Wissenschaftler Ermin Malic und Andreas Knorr bestätigten mit komplexen Berechnungen die Annahmen der Dresdner Gruppe und lie-

„So ein Landau-Niveau-Laser galt lange als unmöglich, doch mit Graphen lässt er sich möglicherweise realisieren.“

### Berliner Forscher berechnen komplexes Modell für Dresdner Experimente

Da es zu solchen Dynamiken zuvor weder Experimente noch Theorien gab, hatten die Dresdner Physiker anfangs Probleme, die Signale richtig zu deuten. Doch nach einigen Versuchen fanden sie eine Erklärung. Das ungewöhnliche Umsortieren wird durch Stoßprozesse zwischen Elektronen verursacht. Einige der per Laser angeregten Elektronen fallen

fernen darüber hinaus detaillierte Einblicke in die zugrundeliegenden Mechanismen. Winnerl: „Während wir experimentelles Neuland betreten haben, gingen die Berliner Kollegen diesen Schritt im Bereich der Theorie. Das war eine sehr gelungene Zusammenarbeit.“ Zudem kooperierten die HZDR-Forscher mit dem französischen Hochfeld-Magnetlabor in Grenoble (Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses – LNCMI) und dem US-amerikanischen Georgia Institute of Technology, Atlanta. →

Mit dieser neuen Entdeckung wird Graphen seinem Ruf als „Wunderstoff“ ein weiteres Mal gerecht, denn der Effekt ist von praktischer Relevanz. Zum Beispiel für die Entwicklung eines Lasers, der Licht mit beliebig einstellbarer Wellenlänge im Infrarot- und Terahertz-Bereich produzieren könnte. „So ein Landau-Niveau-Laser galt lange als unmöglich, doch mit Graphen lässt er sich möglicherweise realisieren. Unsere Forschung hilft dabei, geeignete Landau-Niveaus auszuwählen und damit diesen Traum der Halbleiter-Physiker durchaus wahr werden zu lassen“, merkt Winnerl begeistert an.

Die Forschung wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) innerhalb des Schwerpunktprogramms „Graphen“ gefördert. —

#### PUBLIKATION:

M. Mittendorff, S. Winnerl u.a.: Carrier dynamics in Landau quantized graphene featuring Auger scattering", in Nature Physics 2014 (DOI 10.1038/NPHYS3164)



#### KONTAKT

— Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung am HZDR  
Dr. Stephan Winnerl  
s.winnerl@hzdr.de

— TU Berlin / AG Nichtlineare Optik und  
Quantenelektronik von Halbleitern  
Prof. Andreas Knorr  
andreas.knorr@physik.tu-berlin.de

➤ [www.itp.tu-berlin.de/knorr/](http://www.itp.tu-berlin.de/knorr/)

Foto: Jürgen Jeibmann

// Die Münchner Firma KETEK schickt regelmäßig makellose Silizium-Platten nach Dresden, um sie gezielt mit winzigen Störstellen zu versehen.

## WENN SILIZIUM BESSER SEHEN LERNT

\_TEXT . Christian Döring

Sie haben weder Masse noch Ladung und doch bilden Photonen eine wichtige Grundlage für Leben auf der Erde. Sie sind die Elementarteilchen, aus denen sichtbares Licht und jede andere elektromagnetische Strahlung besteht. Aber wie zählt man solche Lichtteilchen, wenn man sie nicht wiegen oder durch ihre Ladung aufspüren kann? Physiker nutzen hierzu ihre elektromagnetische Wechselwirkung: Immer wenn sie auf Materie treffen, können Prozesse wie der **photoelektrische Effekt** auftreten. In Halbleitern entsteht durch den inneren Photoeffekt elektrischer Strom, mit dem Wissenschaftler direkt auf die Anzahl der einfallenden Photonen schließen.

**IMPLANTATION:** Shavkat Akhmadaliev prüft die Position eines Silizium-Wafers.  
Bild: Matthias Rietschel

Die Detektion wird allerdings schwierig, wenn nur sehr wenige Photonen vorhanden sind. Der Strom ist dann zu gering, um ihn von spontan gebildeten oder externen Störströmen zu unterscheiden und klar einem Lichtteilchen zuzuordnen zu können. Abhilfe schaffen hier zum Beispiel Silizium-Photomultiplier der Münchner Firma KETEK. Sie verstärken den Strom so, dass selbst noch der Einfall eines einzelnen Photons zuverlässig nachgewiesen werden kann.

Möglich machen das Fremdatome, die als Störstellen in das Silizium eingebracht werden. Dieses Dotieren des Halbleiters übernehmen Mitarbeiter des HZDR für die Münchner Firma. Am Ionenstrahlzentrum beschießen sie dazu das Substrat mit Ionen, also geladenen Atomen. Die Ionen kommen erst im Substrat zur Ruhe und sind damit direkt in den Halbleiter integriert. „Bei einer solchen Hochenergie-Implantation ‚vergraben‘ wir also gewissermaßen Fremdatome unter der Silizium-Oberfläche in tieferen Schichten“, erklärt Bernd Schmidt von der HDZR Innovation GmbH, einer Tochterfirma des Zentrums, die solche Servicearbeiten für Industriepartner anbietet. →



Durch die Störstellen in exakt definierter Tiefe können die Eigenschaften des Halbleiters gezielt verändert werden. Bernd Schmidt: „Meist nutzen wir dafür Phosphor-Ionen, aber auch Bor-Ionen sind möglich.“ Der Grund: Phosphor hat ein Außenelektron mehr als das vierwertige Silizium. Es bringt demnach eine zusätzliche negative Ladung mit sich, die nicht im Silizium-Kristallgitter benötigt wird und somit frei beweglich ist. Bor besitzt hingegen nur drei äußere Elektronen – also eines weniger. In der Siliziumstruktur taucht demnach ein positives „Loch“ auf, das ebenfalls frei beweglich ist.

## Eine Lawine von Ladungsträgern

Über freie Elektronen und Löcher kann in den dotierten Schichten Ladung transportiert werden. Es fließt also Strom – allerdings nur, solange die anliegende, äußere Spannung gleich gepolt ist. Bei umgekehrter Polung, der Sperrspannung, werden kaum Ladungen transportiert. „Erst ab einer sehr hohen Sperrspannung kommt es wieder zu einem schlagartigen Stromanstieg, dem ‚Durchbruch‘ der Diode. Der ist in anderen Halbleitern oftmals nicht erwünscht, doch bei Silizium-Photomultipliern kann der Effekt für die Verstärkung kleinster photoelektrischer Effekte genutzt werden“, erklärt der Forscher.

Ein einziges einfallendes Photon löst dann eine Kettenreaktion in der Silizium-Diode aus: In der elektrischen Feldzone des Materials werden die Photoelektronen derart beschleunigt, dass diese ihrerseits weitere elektrisch geladene Teilchen generieren. Es entsteht eine Ladungsträger-Lawine, weshalb der ausgelöste, steile Strom-Anstieg auch Avalanche-Durchbruch genannt wird. Der Wissenschaftler: „Mit der Hochenergie-Implantation können wir sehr genau bestimmen, bei welcher Sperrspannung der Durchbruch einsetzt und sie zudem auch niedrig halten.“ Nur so können die KETEK-Dioden für die Photon-Messung in einem exakt definierten Bereich über der Durchbruchsspannung betrieben werden.

Mit der Implantations-Technologie lassen sich die dotierten Schichten zudem in verschiedenen Tiefen strukturieren. „Wir tragen dazu eine zusätzliche Schicht auf die Siliziumoberfläche auf, die als Implantationsmaske dient“, so Bernd Schmidt. Die eingeschossenen Ionen müssen so einen längeren Weg zurücklegen und das Oberflächenmuster der Maske wird in tieferen Dotierschichten abgebildet. Solche Anpassungen sind besonders wichtig in den Randbereichen der Diode. „Würde man dort das elektrische Feld nicht auf eine solche Weise maßschneidern, ließe sich die Durchbruchsspannung nur schwer kontrollieren“, erläutert der Physiker.

## Einsatz bei bildgebenden Verfahren in der Medizin

Eigentlich ist Bernd Schmidt seit mehreren Monaten im Ruhestand, aber nach über 37 Jahren am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des HZDR zieht es ihn weiterhin an seinen früheren Arbeitsplatz. Der erfahrene Wissenschaftler beteiligt sich dort an der Optimierung von Implantations- und Halbleitertechnologien. Auch mit KETEK verbindet ihn eine lange Geschichte: „Schon Anfang der 1980er Jahre habe ich den

## Photoelektrischer Effekt

**Bei diesem Effekt wird ein Elektron durch die Wechselwirkung eines Lichtteilchens mit Materie aus einer Bindung herausgelöst. Die in Halbleitern auftretende Art des Effekts wird innerer Photoeffekt genannt: Hierbei können Elektronen einen elektrischen Strom verursachen. Es kommt zur Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Dieser photoelektrische Effekt wird beispielsweise auch bei Solarzellen genutzt.**



**SIGNAL:** Experimente mit Elektronen an der ELBE dienen dem Ziel, bessere Detektoren herzustellen. Bild: Matthias Rietschel

Firmengründer Josef Kemmer kennengelernt. Damals haben wir nämlich an ähnlichen Technologien zur Herstellung von Silizium-Detektoren geforscht. Nach der Gründung seiner Firma KETEK 1989 kam es rasch zu einer Zusammenarbeit mit unserem Forschungszentrum in Dresden. Und die hält bis heute an.“

Die von KETEK gefertigten Silizium-Photomultiplier werden auch bereits am HZDR getestet: An der ELBE – dem Zentrum für Hochleistungs-Strahlenquellen – wollen Dresdner Wissenschaftler herausfinden, wie solche Sensoren beim Nachweis von Neutronen helfen könnten. Darüber hinaus bieten die KETEK-Sensoren auch Vorteile für den Einsatz in der Medizintechnik, denn sie werden nicht von Magnetfeldern beeinflusst. Deshalb eignen sie sich gut als Detektoren für kombinierte bildgebende Verfahren. Die starken Felder eines Magnetfeld-Resonanz-Tomographen (MRT) waren hier bislang ein Hindernis. Mit den neuen Photomultipliern kann man nun viel einfacher einen MRT mit einem Positronen-Emissions-Tomographen kombinieren. Und auch bei der derzeit am HZDR erforschten Gamma-Kamera zur Überwachung der Protonen-Krebstherapie kommen Silizium-Detektoren vergleichbarer Bauart zum Einsatz. —

### KONTAKT

\_HZDR Innovation GmbH  
Dr. Bernd Schmidt  
bernd.schmidt@hzdr.de

\_KETEK GmbH  
Dr. Reinhard Fojt  
reinhard.fojt@ketek.net

↗ [www.hzdr-innovation.de](http://www.hzdr-innovation.de)

↗ [www.ketek.net](http://www.ketek.net)

// Um Krebs im Körper zu finden, braucht es Millionstel Millimeter kleine Spürhunde. Am Helmholtz Virtuellen Institut „NanoTracking“ entstehen ganz spezielle Promenadenmischungen.

## SO RICHTIG NANO

\_TEXT . Sascha Karberg



**KONZENTRATION:** In dieser Gelelektrophorese-Apparatur werden Proteine nach ihrem Molekulargewicht getrennt.

Foto: Frank Bierstedt

Mit Hundezucht hat die Arbeit von Holger Stephan eigentlich wirklich nichts zu tun. Das Labor des Chemikers am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf entwickelt Nanopartikel – Milliardstel Meter kleine Kügelchen, die Krebs im Körper aufspüren und bekämpfen sollen. Die von Medizinern heute verwendeten Nanopartikel sind oft zu voluminös, um alle Tumorzellen im Körper von Patienten zu finden und optimal sichtbar zu machen. „Bisher werden vor allem Partikel größer

als 100 Nanometer eingesetzt“, sagt Stephan. Deshalb hat sich sein Team aus Biologen, Chemikern, Physikern, Materialwissenschaftlern und Medizinern am Helmholtz Virtuellen Institut NanoTracking zum Ziel gesetzt, Partikel kleiner als zehn Nanometer zu entwickeln und gleich mit mehreren Eigenschaften auszustatten – und das ist ein Stück weit vergleichbar mit der Hundezucht, denn ein Bernhardiner mag zwar der perfekte Helfer bei der Suche nach Lawinenofern sein, doch ein kleiner, wendiger Dackel ist nun mal besser für die Jagd in Fuchs- und Dachsbauten geeignet. Stephan will Nanokügelchen züchten, die nicht nur besonders klein sind, sondern auch mehrere Fähigkeiten vereinen, mit denen Tumore besser gefunden, besser abgebildet, diagnostiziert und in Zukunft auch therapiert werden können – die Promenadenmischungen unter den Nanopartikeln. →

## Klein und multifunktional

Bislang sind Nanopartikel meist Fettkügelchen, sogenannte Liposomen oder Vesikel, und so groß wie Viren. „Je kleiner man wird, umso anspruchsvoller ist die Entwicklung“, sagt der Chemiker Stephan, der es durchaus mag, „etwas anzupacken, wo noch nicht klar ist, wohin die Reise geht.“ Nicht nur die Herstellung der winzigen Partikel ist eine besondere Herausforderung. „Das Verfahren muss sicherstellen, dass alle Partikel in etwa die gleiche Größe haben.“ Das zu überprüfen, ist bei der geringen Größe der Partikel alles andere als trivial, denn dafür sind spezielle elektronenmikroskopische oder spektroskopische Untersuchungen nötig. Und wenn die Größe stimmt, müssen die chemischen Eigenschaften überprüft werden. Eine Aufgabe, die nicht im Alleingang zu stemmen ist, weshalb bei NanoTracking internationale Forschergruppen aus Europa und Australien zusammenarbeiten. Stephans Labor, das Teil des Instituts für Radiopharmazeutische Krebsforschung am HZDR ist, hat den Fokus der Forschung auf die Markierung von Tumoren mit radioaktiven Molekülen gelegt. „Markieren kann man sehr kleine Moleküle unter einem Nanometer. Und man kann Antikörper markieren, die mindestens zehn Nanometer groß sind“, sagt Stephan. „Aber dazwischen sieht es noch sehr dunkel aus.“

Das Ziel: Robuste, definierte und sehr kleine Partikel herzustellen, die auf ihrer Oberfläche verschiedene Funktionseinheiten tragen. Eine dieser Funktionseinheiten der neuen Nano-Spürhunde ist die Spürnase, mit der ein Tumor im Körper gefunden werden soll. Bislang nehmen Mediziner dafür vor allem Antikörper, also Proteine, die bestimmte Molekülstrukturen auf der Oberfläche von Tumorzellen erkennen können. Aber Antikörper sind selbst schon mindestens 10 Nanometer groß, so dass ein Nanopartikel mit angehefteten

**MITSTREITER:** Holger Stephan (rechts), Sprecher des Helmholtz Virtuellen Instituts „NanoTracking“, mit Manja Kubeil und Kristof Zarschler. Foto: Frank Bierstedt



Antikörpern als Spürnasen insgesamt zu groß werden würde. „Außerdem wollen wir schneller sein als die Antikörper“, sagt Stephan. Oft zirkulieren die großen Moleküle recht lange durch den Körper und brauchen einen ganzen Tag, um den Tumor zu markieren. Deshalb versucht Stephans Team, nur die entscheidenden, zielerkennenden Teile eines Antikörpers an die Nanopartikel zu heften.

„Gestartet sind wir mit den kleinstmöglichen zielsuchenden Einheiten: Peptiden“, sagt Stephan. Diese kurzen Proteinstücke haben eine Oberflächenstruktur, die wie ein Schlüssel zum Schloss beispielsweise zu einem bestimmten Rezeptormolekül auf der Oberfläche einer Krebszelle passt. Aussichtreiche Ergebnisse erzielten die Forscher mit Kamel-Antikörpern, die kleiner als menschliche sind. „Da wir außerdem nur ein spezielles Fragment benötigen – nämlich den Teil des Moleküls, der an bestimmte Krebszellen bindet –, wird es möglich, die Nanopartikel viel kleiner zu gestalten“, führt Kristof Zarschler, Biologe in Stephans Labor, aus. „Und das funktioniert auch unter biologisch relevanten Bedingungen, die der Situation im Patienten sehr ähnlich sind.“

## Nanopartikel mit Signalwirkung

Das Nanopartikel muss aber noch mehr können, als nur den Tumor zu finden. So wie ein Dackel „anschlägt“, wenn der Fuchs gestellt ist, muss Stephans Team ein Partikel züchten, das ein Signal geben und damit den Arzt buchstäblich ins Bild setzen kann. Dazu sollten die Partikel zum Beispiel magnetische Eigenschaften haben, damit der Arzt sie per Magnet-Resonanz-Tomographie im Körper des Patienten wiederfindet. Deshalb werden in das Nanokügelchen Magnetite – magnetische Eisenmoleküle – eingebaut. Eine andere Methode, um Form, Größe und Ort eines Tumors abzubilden, sind Fluoreszenzfarbstoffe. Stephan kann sie an den Nanopartikel hängen, so dass sie im Körper des Patienten mit einer bestimmten Lichtwellenlänge angeregt werden können. Der Farbstoff fluoresziert dann, leuchtet also mit einer charakteristischen

Wellenlänge und verrät so den Ort des Tumors.

„Jede dieser Methoden allein ist gut, deckt aber nicht alles ab“, sagt Stephan. Deshalb sollen zukünftige Nanopartikel möglichst beide Nachweismethoden vereinen, also multifunktional sein.

„Radioaktiv markierte Nanopartikel finden wir mit der Positronen-Emissions-Tomographie“, so der Forscher. Damit könne man zwar geringste Mengen der Partikel nachweisen. „Aber die Auflösung dieser Methode liegt nur im Millimeterbereich.“ Um einzelne Krebszellen oder gar ins Zellinnere zu sehen, sei deshalb die Fluoreszenzmarkierung die Methode der Wahl. Bislang können Ärzte diese Methoden nur nacheinander anwenden. Es wäre jedoch ein großer Vorteil, wenn sie in der gleichen Untersuchung zwischen beiden Techniken wählen und die Bilder übereinanderlegen könnten.

Die kleinsten Nanopartikel, die Stephans Team im Tierversuch testen konnte, sind kleiner als fünf Nanometer. Sie bestehen aus metallischen

Silizium-Teilchen, tragen aber noch keine weiteren Funktionseinheiten. „Man kann also nicht erwarten, dass die im Körper den Weg zum Tumor finden, aber man kann erst einmal beobachten, wie sie sich im Körper verteilen und verhalten.“ Den ersten Tests nach werden die Partikel schnell wieder aus dem Körper gespült. Was durchaus ein gutes Zeichen ist, denn normalerweise werden Nanoteilchen, die größer als sechs Nanometer sind, von Fresszellen aufgenommen und in der Leber eingelagert. Um das zu umgehen, wird die Oberfläche von Nanopartikeln wasserlöslicher gemacht, in der Regel mit einer Hülle aus Polyethylenglykol (PEG), wodurch das Partikel aber größer wird. „Die Silizium-Teilchen wären eine Lösung, aber es ist sehr schwierig, sie mit den nötigen Funktionen auszustatten, wie zum Beispiel einer tumorsuchenden Einheit“, gibt Stephan zu bedenken. Bislang stehe man ganz am Anfang, dafür die nötigen chemischen Methoden zu entwickeln.



**NANO-ANALYSE:** Madlen Matterna an der Anlage für „Ultra-hochleistungsflüssigkeitschromatographie“, mit der in sehr kurzer Zeit chemische Reaktionsprodukte in geringsten Konzentrationen analysiert werden können. Foto: Frank Bierstedt

„Mit Partikeln anderen Typs kratzen wir an der 10-Nanometer-Grenze“, so der Chemiker. Neben Silizium- und Magnetit-Partikeln versuchen die Dresdner Forscher auch sogenannte „Upconverting Nanopartikel“ zu entwickeln. Diese „Upconverter“ bestehen aus Seltenerd-Verbindungen, die fluoreszieren können, allerdings auf eine einzigartige Weise: Während Fluoreszenzfarbstoffe normalerweise mit kurzwelligem Licht angeregt werden und dann langwellig fluoreszieren, ist es bei den „Upconvertern“ genau anders herum. Das ist praktisch, denn mit langwelliger Strahlung kommt man besser durch das äußere Gewebe, um die Partikel am Tumor zum Fluoreszieren anregen zu können. „Das Problem ist nur, dass diese Teilchen noch deutlich größer als zehn Nanometer sind“, sagt Stephan. Und je kleiner die Teilchen sind, umso geringer ist die Fluoreszenzausbeute. Um solche Probleme zu lösen, arbeitet Stephan im Virtuellen Institut mit Forschern der Monash University im australischen Melbourne zusammen.

## Ziel: Nano-Baukasten für die Krebsmedizin

Dazu gehören auch Tests, ob das, was sich im Reagenzglas bewährt, im Körper funktioniert. Denn dabei gibt es durchaus unerwartete Probleme: „Sobald ein Nanopartikel in ein biologisches Milieu wie Blut, Serum oder Speichel kommt,

wird es durch Proteine belegt“, sagt Stephan. „Diese ‚Protein-Corona‘ kann schnell alles zunichte machen, was man sich an Funktionen für das Partikel überlegt hat, weil die Proteine die funktionellen Einheiten einfach verdecken.“ So wie der beste Spürhund-Rüde den Weg nicht mehr findet, wenn er von einer Meute läufiger Hündinnen umringt ist. „Man kann das verhindern, indem man die Oberfläche des Partikels ladungsneutral gestaltet und damit die Anziehungskraft reduziert“, erklärt der Chemiker. Allerdings werden dadurch die Möglichkeiten eingeschränkt, bestimmte Funktionseinheiten an die Partikel zu heften. Deshalb versucht Stephan derzeit, die Partikel „zwitterionisch“ zu gestalten. Dabei werden auf der Oberfläche des Partikels die gleiche Anzahl positiv und negativ geladener Funktionseinheiten verteilt – in der Summe ist das Partikel dann ladungsneutral.

Mit welchen Funktionen man das Nanoteilchen ausstattet, kommt ganz auf die Aufgabe an, die es erfüllen soll. „Für die Bildgebung ist es ziemlich egal, ob das Partikel in eine Zelle gelangt oder nur auf der Oberfläche bleibt“, sagt Stephan. Für die Therapie könnte das jedoch entscheidend sein. „Bislang konzentrieren wir uns darauf, Nanopartikel für die Diagnostik zu entwickeln.“ Langfristig soll Stephans Baukastensystem es ermöglichen, den Spürhunden auch das Zubeißen anzuzüchten – die Partikel also auch mit einer therapeutischen Funktion auszustatten. Das könnten Arznei-Moleküle sein, die die Nanokügelchen im Tumor freisetzen, oder auch Radionuklide, die durch ihre Strahlung das Krebsgewebe zerstören. Kommt darauf an, welche Kreuzungen sich in der Dresdner Partikelzucht künftig bewähren. —

## PUBLIKATIONEN:

K. Pombo-García “Design, synthesis, characterisation and in vitro studies of hydrophilic, colloidally-stable,  $^{64}\text{Cu}(\text{II})$ -labelled, ultra-small iron oxide nanoparticles in a range of human cell lines”, in RSC Advances 2013 (DOI: 10.1039/C3RA43726D)

K. Pombo-García u. a.: “Zwitterionic-coated „stealth“ nanoparticles for biomedical applications: recent advances in countering biomolecular corona formation and uptake by the monomolecular phagocyte system”, in Small 2014 (DOI: 10.1002/smll.201303540)

K. Zarschler u.a.: “Diagnostic nanoparticle targeting of the EGF-receptor in complex biological conditions using single-domain antibodies”, in Nanoscale 2014 (DOI: 10.1039/C4NR00595C)

K. Viehweger u.a.: “EGF receptor-targeting peptide conjugate incorporating a near-IR fluorescent dye and a novel 1,4,7-triazacyclononane-based  $^{64}\text{Cu}(\text{II})$  chelator assembled via click chemistry”, in Bioconjugate Chemistry 2014 (DOI: 10.1021/bc5001388)

## KONTAKT

—Helmholtz Virtuelles Institut NanoTracking  
Sprecher: Dr. Holger Stephan  
h.stephan@hzdr.de

„Principal Investigators“: HZDR, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Monash University Melbourne, Universität Heidelberg, University College Dublin. Daneben gibt es weitere assoziierte Partner.

➤ [www.hzdr.de/nanotracking](http://www.hzdr.de/nanotracking)

//Magnetfelder wirbeln die Wiege des Sonnensystems durcheinander.

## TURBULENTE GEBURTshelfER

\_TEXT - Roland Knauer

ESOCAST 69: Staubscheibe  
um den jungen Stern HL Tauri  
im Sternzeichen Stier. Bild: ESO

Bereits ein Eiskunstläufer zeigt deutlich, dass Sonnen nicht einfach entstehen können, wenn eine gigantische Wolke aus Staub und Gas im Weltraum zusammenschnurrt: Legt der Schlittschuhfahrer seine vorher ausgestreckten Arme eng an den Körper, wirbelt er gleich viel schneller um die eigene Achse. Das physikalische Gesetz dahinter kennen Physiker seit Jahrhunderten als „Erhaltung des Drehimpulses“ und es gilt nicht nur für Pirouetten auf dem Eis, sondern eben auch für das Entstehen von Sonnen. Wenn sich deren Masse aus einer großen Wolke zusammenzieht, müsste der neue Stern immer schneller rotieren, bis es ihn schließlich zerreißt. Es sei denn, Magnetfelder verwirbeln die sich zusammenziehenden Wolken im Weltraum, vermuten Theoretiker. Ob es diese Turbulenzen auch in der Praxis gibt, untersuchen Frank Stefani vom Institut für Fluidodynamik und seine Kollegen seit einigen Jahren im Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.

### Eine schwierige Geburt

Die Experimente dazu klingen zunächst einmal recht einfach, brauchen die Forscher doch nur ein Magnetfeld und eine „Wolke“. Mit ersterem haben die HZDR-Wissenschaftler reichlich Erfahrung. Und die Wolke sollte ein wenig elektrischen Strom leiten. Für diese Leitfähigkeit sind im Weltraum Atome mit einer elektrischen Ladung zuständig, die Naturwissenschaftler als „Ionen“ bezeichnen. Diese wiederum spielen eine große Rolle, wenn sich die Gas- und Staubwolke im Weltraum zusammenzieht und dabei eine gigantische Scheibe entsteht, die um ihr eigenes Zentrum kreist. „Solche Akkretionsscheiben aber sind nichts anderes als rotierende Strömungen mit nach außen wachsendem Drehimpuls, die aus hydrodynamischer Sicht extrem stabil sind“, erklärt Frank Stefani.

Wenn solche Scheiben zusammenschnurren, lässt das Gesetz von der Erhaltung des Drehimpulses das schrumpfende Gebilde genau wie ein Eiskunstläufer, der seine Arme an den Körper anlegt, immer schneller rotieren. Es sei denn, irgendeine Kraft spaltet die Scheibe in zwei ungleiche Teile: Ein sehr kleiner Teil von Gas und Staub in den äußeren Bereichen der Akkretionsscheibe nimmt dann einen sehr großen Teil des Drehimpulses mit. Der übergroße Rest der Masse schnurrt zusammen, ohne allzu schnell zu rotieren, weil ja der größte Teil des Drehimpulses abgegeben wurde. In unserem Sonnensystem steckt zum Beispiel fast die gesamte Masse in der Sonne. Die restlichen 0,14 Prozent haben sich weiter draußen zu Planeten und Asteroiden zusammengeballt, die aber den weitaus größten Teil des Drehimpulses aus der Akkretionsscheibe mitgenommen haben, aus denen das System vor ungefähr 4,6 Milliarden Jahren entstand.

### Theorie und Praxis

Welche Kraft aber treibt diese Aufspaltung des Drehimpulses an? Genau wie bereits 1959 Jewgeni Welichow von der Moskauer Lomonossov-Universität, vermuteten 1991 auch Steven Balbus und John Hawley von der Universität im US-amerikanischen Bundesstaat Virginia Magnetfelder als Ursache. An dieser Stelle kommen die Ionen und die elektrische Ladung in den Akkretionsscheiben ins Spiel, weil sie nicht nur Magnetfelder erzeugen, sondern diese wiederum auf die Wolke zurückwirken. Dabei aber verursachen die Magnetfelder in den extrem stabilen Strömungen Turbulenzen. Diese Magneto-Rotationsinstabilität – oder kurz „MRI“ – kann einen großen Teil des Drehimpulses mit einem winzigen Teil der Masse nach außen tragen. Der riesige Rest könnte dann zu einer Sonne zusammen schrumpfen, die nur relativ gemächlich rotiert, weil sie nur einen winzigen Teil des ursprünglichen Drehimpulses mitgenommen hat. →

## Rotierende Zylinder

Um diese Theorie in der Realität zu testen, verwenden die HZDR-Forscher ein Modell für eine solche Akkretionsscheibe. Als Wolke dient eine flüssige Mischung aus Gallium, Indium und Zinn, die im Raum zwischen einem größeren und einem in seiner Mitte befindlichen, kleineren Zylinder kreist. Rotiert nur der innere Hohlzylinder zum Beispiel in zehn Sekunden einmal um seine eigene Achse, entsteht in der Flüssigkeit eine walzenförmige Bewegung.

Wenn der Durchmesser des äußeren Zylinders doppelt so groß wie der des inneren ist, verschwinden diese Turbulenzen im flüssigen Metall, wenn der äußere Zylinder ebenfalls um seine eigene Achse rotiert und für eine Drehung 40 Sekunden oder weniger braucht. Rotiert der äußere Zylinder in rund 29 Sekunden einmal um seine Achse, nennen die Forscher das eine „Kepler-Rotation“, weil diese Verhältnisse einer Akkretionsscheibe im Weltraum ähneln.

## Doppeltes Magnetfeld

Wirkt ein Magnetfeld so, dass einer der Magnetpole oberhalb und der andere unterhalb der Zylinder liegt, sollten ähnlich wie im Kosmos Turbulenzen im flüssigen Metall entstehen. Allerdings klappt das nur bei sehr starken vertikalen Magnetfeldern und hohen Rotationsgeschwindigkeiten, die sich bisher im Labor nicht verwirklichen ließen.



**VERDICHUNG:** Martin Seilmayer (vorn) und Klaus Timmel holen einen astrophysikalischen Effekt ins Labor, der erklärt, wie sich Gas- und Materiescheiben verdichten.  
Foto: Rainer Weisflog

Daher schlug Günther Rüdiger vom Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) eine Modifikation vor: Lassen die Forscher durch einen mit Wasser gekühlten Kupferstab in der Mitte des inneren Zylinders einen elektrischen Strom von einigen Tausend Ampere fließen, erzeugen sie ein nahezu kreisförmiges Magnetfeld rund um die Zylinder. Zusammen mit dem vertikalen Magnetfeld entstehen so Magnetfeldlinien, die sich in einer Helix-Schleufe um die Zylinder winden. Diese Anordnung benötigt dann kleinere Magnetfelder, die Zylinder müssen sich langsamer drehen und die HZDR-Forscher konnten bereits 2006 Turbulenzen und damit eine helikale MRI nachweisen.

## Rauschen statt Signal

Schalten die Forscher nur das kreisförmige Magnetfeld, nicht aber das senkrechte ein, sollten ebenfalls Turbulenzen entstehen. Diese azimuthale MRI hat eine etwas andere Struktur und es sollte ein Strom von mindestens zehntausend Ampere durch den Kupferstab fließen. Die in den Stromquellen auftretenden Schaltvorgänge im Megahertz-Bereich aber stören die Ultraschall-Messungen bei ähnlichen Frequenzen, mit denen die Forscher die Turbulenzen beobachten. In seiner Doktorarbeit tüftelte Martin Seilmayer daher raffinierte Methoden aus, mit denen man das entstehende Rauschen unterdrücken und das gesuchte Signal herausfiltern kann.

## Die Kepler-Grenze fällt

Nach beinahe zwei weiteren Forschungsjahren haben die HZDR-Wissenschaftler die azimuthale MRI inzwischen gut untersucht. Dabei ist das vielleicht interessanteste Resultat mit einem kleinen Schönheitsfehler des Experiments verbunden. Die Zuleitungen des starken Stromflusses verformen das theoretisch kreisrunde Magnetfeld ein wenig. Anders als beim helixförmigen Magnetfeld zeigen sich jetzt auch Turbulenzen, wenn der äußere Zylinder sich in 29 Sekunden einmal dreht. Das aber stimmt gut mit den Kepler-Rotationen der Akkretionsscheiben im Weltraum überein – das Experiment bestätigt also die Theorie. —

### PUBLIKATION:

M. Seilmayer u. a.: "Experimental evidence for nonaxisymmetric magnetorotational instability in a rotating liquid metal exposed to an azimuthal magnetic field", in Physical Review Letters 2014 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.024505)

### KONTAKT

— Institut für Fluidynamik am HZDR  
Dr. Frank Stefani  
f.stefani@hzdr.de

// Der Bio-Bergbau liefert überzeugende Lösungen, um wirtschaftlich relevante Metalle effizient und umweltschonend aus Erzen zu lösen. Neue Forschungsansätze aus dem deutsch-französischen Kooperationsprojekt EcoMetals sollen nun den Kupferabbau aus heimischen Rohstoffquellen ermöglichen.

## MIT MIKROBEN NACH KUPFER SCHÜRFEN

\_TEXT . Tina Schulz



**ALLES BIO:** Für die Erschließung geringer Mengen von Kupfer gilt die Biolaugung als effizient und umweltfreundlich. Schema: Sander Münster

Dicht gedrängt stehen sie in dem kleinen, staubigen Aufzug, die Köpfe bedeckt mit Helm und Grubenlampe, die Füße geschützt durch festes Schuhwerk. Mit einem Ruck rauscht der Käfig in die Tiefe. Bei knapp 1.000 Metern ist das Forscherteam aus Franzosen, Polen und Deutschen endlich am Ziel. Sie sind in das Bergwerk Polkowice-Sieroszowice nahe dem polnischen Lubin eingefahren, um mehr über die Nahrungsquelle ihrer Forschungsobjekte zu erfahren: Kupferschiefer. In ihm stecken Kupfersulfide – schwer lösliche Verbindungen aus Metall und Schwefel –, die auf dem Speiseplan verschiedenster Mikroorganismen stehen. Wissenschaftler und Industriepartner aus dem internationalen Kooperationsprojekt EcoMetals wollen mit Bakterien vor allem das begehrte Kupfer aus den europäischen Erzen gewinnen. Koordiniert wird das Vorhaben durch das zum HZDR gehörige Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF), das innovative und nachhaltige Ressourcentechnologien entwickelt.

Passenderweise heißt die Technologie, mit der Bakterien Metalle aus Erzen gewinnen, Biomining (zu Deutsch: „Bio-Bergbau“). Ganz neu ist das Prinzip allerdings nicht. Schon lange gilt Biomining als grüne Alternative zur traditionellen Verhüttung, die große Mengen an Energie verbraucht, um Erze in Hochöfen zu schmelzen. Etwa 15 Prozent der weltweiten Kupferproduktion werden bereits durch das Biomining gefördert, ebenso drei Prozent der Goldproduktion sowie in geringem Umfang auch Nickel, Kobalt und Zink. Ein besonders erfolgreiches Verfahren, das Minenbetreiber in Chile, Südafrika oder Australien schon seit Jahren anwenden, ist die Biolaugung – auch Bioleaching genannt. Dafür wird das Erz zerkleinert und mit natürlich im Untergrund vorkommenden Bakterien versetzt. Ihre Arbeit können die kleinen Kumpel aber nur dann aufnehmen, wenn das Milieu, das sie umgibt, ausreichend sauer ist. Deswegen werden die abgedichteten Halden zumeist mit verdünnter Schwefelsäure beregnet. Läuft das Wachstum der Bakterien einmal auf Touren, gewinnen sie ihre Energie, indem sie das unlösliche Kupfersulfid zu wasserlöslichem Kupfersulfat oxidieren und wiederum Schwefelsäure produzieren. Auf diese Weise reichert sich das Kupfer in der austretenden Flüssigkeit an. →

## Stoffwechselprodukte statt Bakterien

Anders als die Kupfererze in Chile ist der heimische Kupferschiefer sehr komplex. „Der Gehalt an Kupfer im Kupferschiefer ist höher, aber das Metall ist sehr fein verteilt. Zudem ist das Erz in Deutschland oder Polen reich an Karbonaten und organischen Substanzen, die eine effiziente und ökologische Kupfergewinnung mit herkömmlicher Biolaugung unmöglich machen“, sagt Katrin Pollmann, Leiterin der Forschungsgruppe Biotechnologie am HIF und Projektleiterin von EcoMetals. „Würden wir das herkömmliche Bioleaching auf den Kupferschiefer anwenden, würde durch die entstehende Säure der pH-Wert in der Probe sinken. Als Folge würden sich die Karbonate im Erz lösen und der pH-Wert in den neutralen Bereich ansteigen. Und das wiederum vertragen die säureliebenden Organismen nicht.“

Deswegen entwickeln Katrin Pollmann und ihr Team – Wissenschaftler aus dem HIF und aus dem Institut für Ressourcenökologie am HZDR – ganz neue Lösungsansätze für das Bioleaching von Kupferschiefer. „Während sich unser Partner aus dem französischen Büro für Geologie und Bergbauforschung BRGM eher auf die klassische Laugung von vorbehandelten Erzen konzentriert, belassen wir das Erz in einem neutralen Milieu und versetzen es direkt mit den Stoffwechselprodukten der Bakterien“, so die Biologin. Solche Stoffwechselprodukte sind organische Verbindungen wie beispielsweise Zitronen- oder Oxalsäure. Sie eignen sich deshalb für das Laugen, weil sie gut mit den Metallen wechselwirken.



**BIOREAKTOREN:** Wissenschaftler vom Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Sabine Kutschke (rechts) und Franziska Lederer, erforschen biotechnologische Verfahren zur Gewinnung und Aufbereitung von Metallen und Seltenen Erden. Foto: Frank Bierstedt

Für ihre Untersuchungen nutzen die Wissenschaftler bereits aus der Umwelt isolierte Bakterienstämme, kultivieren diese in einer Nährlösung und testen, wie die daraus gewonnenen Stoffwechselprodukte mit den Erzproben reagieren. Dabei ist die Auswahl bei der großen Menge an möglichen Bakterienstämmen und ihren Stoffwechselprodukten keine leichte Aufgabe. „Die Prozesse sind bisher noch sehr langsam und nicht so effizient, wie wir es gerne hätten. Außerdem müssen wir Schritt für Schritt testen, unter welchen Bedingungen die Kulturen optimal gedeihen“, gibt die Expertein zu bedenken.



**Im internationalen Forschungsvorhaben EcoMetals arbeiten 15 Partner aus Frankreich, Polen und Deutschland zusammen. Gefördert wird das interdisziplinäre Projekt sowohl vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) als auch vom französischen Pendant, der Agence Nationale de la Recherche (ANR), aus Anlass des 50-jährigen Jubiläums des Élysée-Vertrages.**

**Ziel des Projektes mit einer Laufzeit von drei Jahren ist es, innovative biohydrometallurgische Verfahren zur Gewinnung von Kupfer und weiterer bedeutender Begleitelemente aus primären – aus der Erde gewonnenen – und sekundären – verarbeiteten und daher wiederverwendbaren – Rohstoffen zu entwickeln. Das Fördervolumen aus öffentlichen Quellen beläuft sich auf gut fünf Millionen Euro.**

## Bio-Bergbau als internationaler Forschungsauftrag

Trotzdem ist das EcoMetals-Team auf einem guten Weg und sicher, dass sich die Forschung auf dem Gebiet der Geobio-technologie – insbesondere für die Anwendung auf alten Bergbauhalden – lohnt. „Deutschland ist sehr stark von Rohstoffimporten abhängig. Einerseits können wir mit dem Bio-Bergbau unser vorhandenes Rohstoffpotenzial besser ausschöpfen, andererseits wollen wir auch Exportländern zu einem effizienten und ökologischen Rohstoffabbau verhelfen“, betont Katrin Pollmann. Um das grüne Bergbau-Zeitalter voranzubringen, arbeiten Forscher und Industriepartner im EcoMetals-Projekt an einer breiten Palette von biologischen Gewinnungsstrategien. Unter anderem designen Biotechnologen maßgeschneiderte Moleküle für die Rückgewinnung metallischer Rohstoffe aus Laugungslösungen. Dieses Verfahren nennt sich Biosorption.

Für EcoMetals ist das HIF nicht nur forschend tätig, es ist auch Gesamtkoordinator des Projekts. „Die Koordination eines doch recht großen Verbundprojektes mit insgesamt 15 Partnern aus drei Ländern ist eine spannende Herausforderung. Am Anfang schien für jedes gelöste Problem ein neues aufzutauchen, doch mittlerweile konnten wir eine angemessene Managementstruktur aufbauen, sodass das Projekt jetzt auf Kurs ist und die wissenschaftlichen Herausforderungen im Vordergrund stehen“, freut sich Stefan Dirlich, EcoMetals-Projektkoordinator. Bis es soweit ist, dass die Bakterien tatsächlich im groß-industriellen Maßstab für die europäische Metallgewinnung eingesetzt werden, kann es jedoch noch eine Weile dauern. Dennoch sind sich deutsche, französische und polnische Wissenschaftler sicher: Die kleinen Kumpel werden noch eine große Rolle bei der nachhaltigen und umweltfreundlichen Rohstoff-Versorgung spielen. —

### KONTAKT

\_Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie am HZDR  
Dr. Katrin Pollmann | k.pollmann@hzdr.de  
Dr. Stefan Dirlich | s.dirlich@hzdr.de

➤ [www.ecometals.org](http://www.ecometals.org)  
➤ [www.brgm.eu](http://www.brgm.eu) (BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières)

// Um Materialversagen in Komponenten von Kernreaktoren zu verhindern, setzen HZDR-Forscher Werkstoffe extremen Bedingungen aus – damit im Notfall nichts schief läuft.

## DER VERSPRÖDUNG GRENZEN SETZEN

\_TEXT . Simon Schmitt

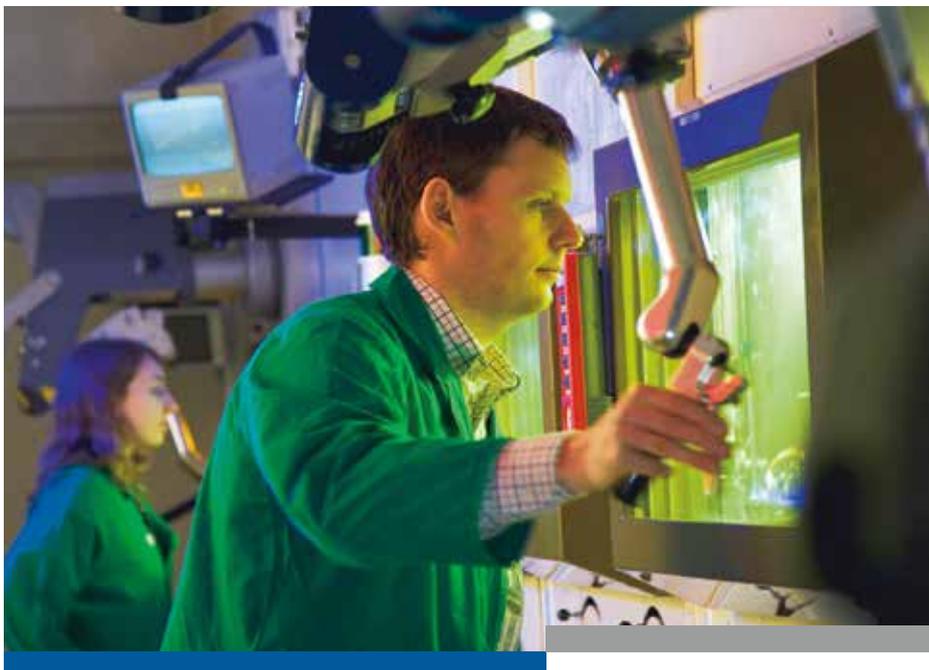
Mit voller Wucht rauscht der Pendelhammer auf den länglichen Quader, der in eine spezielle Vorrichtung eingespannt ist, herab. Nur ein kurzes, knackendes Geräusch durchdringt den Raum, als der Stahl in der Mitte zerbricht. Die V-förmig eingekerbte Probe ist kein Widerstand für das Werkzeug, das auf seiner halbkreisförmigen Laufbahn den Körper zerschlägt, bevor es zum Stehen kommt. Das Experiment simuliert eine schlagartige Beanspruchung von Werkstoffen, um ihre Zähigkeit zu testen. Durch Verformungsprozesse absorbiert die Probe beim Aufprall einen Teil der Energie. Deswegen wird der Hammer – abhängig von der Widerstandskraft des verwendeten Materials – auf einer gewissen Höhe abgebremst.

Ein typischer Kerbschlag-Biegeversuch, wie ihn die Werkstoffprüfung häufig einsetzt. Anders als in konventionellen Prüfhallen steht die Anlage aber nicht im offenen Raum. Vielmehr schirmen Bleiwände und Bleiglasfenster sie von den Forschern ab. Denn bei dem zu prüfenden Material handelt es sich um Stahl aus Reaktordruckbehältern europäischer Kernkraftwerke. „Diese Untersuchung können wir aufgrund der radioaktiven Strahlenbelastung nur in sogenannten heißen Zellen durchführen“, erzählt Eberhard Altstadt. „Dies ist nur in wenigen Einrichtungen in Europa möglich.“ Der Ingenieur nutzt das HZDR-Radionuklidlabor, um den Einfluss von Neutronen auf die mechanischen Eigenschaften und die Mikrostruktur des Stahls zu erforschen.

Mit 2,6 Millionen Euro unterstützte die Europäische Union von 2010 bis 2014 diese Untersuchungen, die das HZDR und 15 Partnereinrichtungen im Projekt LONGLIFE durchführten. In Zeiten der Energiewende mag diese Förderung manchem Beobachter merkwürdig erscheinen. Dieses Denken, das nur bis an die deutsche Grenze reicht, greift aber zu kurz, wie Altstadt meint: „Unabhängig vom deutschen Atomausstieg ist die Reaktorsicherheit ein internationales Problem. Gerade unsere Nachbarn schaffen Voraussetzungen für längere Laufzeiten der Kernkraftwerke. Ursprünglich war ihr Betrieb auf 40 Jahre ausgelegt. Deshalb müssen wir sicherstellen, dass Alterungseffekte in den Reaktormaterialien die Sicherheit bei längeren Laufzeiten nicht beeinträchtigen.“

### Sind die Materialien robust genug?

Neben mechanischen Eigenschaften, wie Härte, Zähigkeit oder Streckgrenze – der Spannung, bei der sich ein Werkstoff durch einmaliges Ziehen dauerhaft verformt –, interessiert sich Altstadt vor allem für die Veränderungen auf der atomaren Ebene. Denn die schnellen Neutronen, die bei der Kernspaltung im Reaktor entstehen, führen zu Defekten im Metallgitter des Stahls und lassen ihn langsam verspröden. Besonders im Fall einer möglichen Notkühlung des Reaktorkerns könnten die thermomechanischen Beanspruchungen – also der schnelle Übergang von hohen zu niedrigen Temperaturen – unter diesen Umständen zu einem Bruch führen. Mittels sogenannter Voreilproben wird deshalb regelmäßig die Zähigkeit der Materialien überprüft. →



**GESCHICK:** Alle für die Untersuchung bestrahlter Materialien benötigten Werkzeuge und Apparaturen sind in heißen Zellen untergebracht.  
Foto: Rainer Weisflog



**PROBENNAHME:** Am HZDR werden einmalige Materialproben von Reaktordruckbehältern des ehemaligen Kernkraftwerks Greifswald untersucht. Foto: Energiewerke Nord

„Uns ging es darum, herauszufinden, ob die Vorhersagemodelle auch für längere Laufzeiten stimmen oder ob sie vielleicht nachgebessert werden müssen“, beschreibt Altstadt den Fokus von LONGLIFE. Anhand einer Vielzahl bestrahlter Stahlproben aus europäischen Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren ermittelte das internationale Team um die Rossendorfer Forscher den Einfluss, den der Neutronenfluss – die Intensität der Bestrahlung – in einer gewissen Zeit auf die Materialien hat. „Wir haben bei den Untersuchungen festgestellt, dass die mechanischen Eigenschaften stärker beeinträchtigt werden, wenn eine bestimmte Neutronendosis in kürzerer Zeit erreicht wird“, erläutert Altstadt. „Prognostizierte Alterungseffekte aus Voreilproben werden deshalb im Vergleich zu den tatsächlich auftretenden Auswirkungen überschätzt, da bei diesen Proben der Neutronenfluss höher ist als am Reaktordruckbehälter im Normalbetrieb. Die Vorhersagen liegen dadurch auf der sicheren Seite.“

Aber der Abteilungsleiter für Strukturmaterialien hat nicht nur die derzeit laufenden Kernkraftwerke im Kopf. Auch die Reaktoren der vierten Generation, wie sie momentan zum Beispiel in Frankreich und Belgien entwickelt werden, beschäftigen den Ingenieur: „Die Bedingungen sind hier ganz anders. Die Betriebstemperaturen sind zum Beispiel viel höher. Außerdem sind die Materialien einer höheren Bestrahlung ausgesetzt, da sie als Hülle von Brennelementen eingesetzt werden. So sind sie näher an der Kernreaktion als Stähle aus Reaktordruckbehältern.“ Im EU-Programm MATTER wollen Altstadt und seine Mitarbeiter deshalb Materialien herstellen, die für diese Bedingungen geeignet sind.

## Werkstoffe für fortgeschrittene Reaktorkonzepte

Ein heißer Kandidat sind Eisen-Chrom-Legierungen, die mit Partikeln von Yttriumoxid verstärkt werden. Diese Materialien versprechen eine exzellente Festigkeit bei hohen Temperaturen und eine große Toleranz gegenüber den Bestrahlungseffekten. „Nun geht es darum, nur wenige Nanometer große Oxidpartikel gleichmäßig in der Legierung zu verteilen, damit die anvisierten mechanischen Eigenschaften erreicht werden“, beschreibt Altstadt eines der nächsten Ziele. Wie sich die verstärkten Eisen-Chrom-Legierungen unter Neutronenbestrahlung verhalten, erforscht er in dem EU-Projekt MATISSE. Dies ergänzt sich hervorragend mit einem weiteren Arbeitspaket von MATTER. Hier dreht sich wieder alles um die Frage, wie die Neutronen die mechanischen Eigenschaften von Materialien, die als Bauteile in Reaktoren der vierten Generation eingesetzt werden könnten, beeinflussen.

„Da diese Werkstoffe im Vergleich zu den Stählen aus den Reaktordruckbehältern allerdings einer höheren Strahlung ausgesetzt sind, nutzen wir in diesem Fall Kleinprobenverfahren“, erläutert der Dresdner Forscher. „Dadurch können wir die Eigenschaften mit möglichst geringen Materialmengen bestimmen.“ Altstadt unterzieht deshalb bestrahlte Proben aus Eisen-Chrom-Legierungen und Hoch-Chrom-Stählen einem Small-Punch-Test. Ähnlich wie beim Kerbschlag-Biegeversuch werden auch hier die Werkstoffe gezielt geschädigt. Ein halbkugelförmiger Stempel belastet dabei eine schmale Scheibe so lange, bis sich infolge der Durchbiegung ein Riss bildet. Aus der aufgebrachten Kraft und der Verschiebung kann der Ingenieur die Zähigkeit des Materials ermitteln.

Um den Einfluss der Neutronen zu simulieren, greift Altstadt außerdem auf Ionen – elektrisch geladene Teilchen – zurück: „Über Ionenbestrahlung können wir die gewünschte Strahlenschädigung in wesentlich kürzerer Zeit erreichen, ohne das Material dabei radioaktiv zu belasten.“ Im Gegensatz zu Neutronen dringen die Ionen aufgrund ihrer Ladung aber nicht so tief ein, sodass nur eine dünne Schicht von etwa einem Mikrometer geschädigt wird. Deshalb nutzen die HZDR-Forscher die sogenannte Nano-Indentierung, bei der eine kleine Diamantspitze in die Oberfläche des Werkstoffs gedrückt wird. Aus dem Verlauf der Eindringtiefe und der dazu notwendigen Last können sie Härte und Streckgrenze des Materials ableiten.

So zerbrechen oder zerreißen die HZDR-Forscher im Radionuklidlabor wohl noch einige Werkstoffe. Aber nur, damit sie im Ernstfall standhalten. →

### PUBLIKATION:

E. Altstadt u. a.: "FP7 Project LONGLIFE: Overview of results and implications", in Nuclear Engineering and Design 2014 (DOI 10.1016/j.nucengdes.2014.09.003)

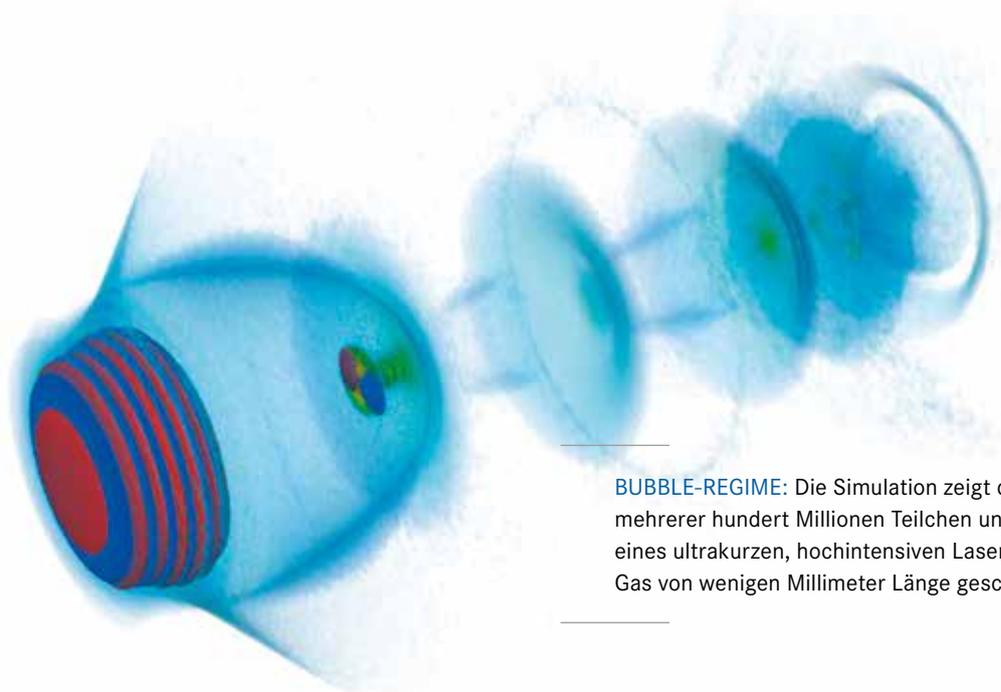
### KONTAKT

„Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung am HZDR  
Dr. Eberhard Altstadt  
e.altstadt@hzdr.de

// Tausende Bilder aus Zellen, Millionen von Erbgutsequenzen, Billionen von Gasteilchen aus Sonnen ferner Galaxien – ohne Supercomputer wie am Dresdner Zentrum für Hochleistungsrechnen oder am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf können Forscher ihre alltäglich anfallenden Datenmengen weder speichern noch verstehen.

## DIE TOUR DER BITS UND BYTES

Text . Sascha Karberg



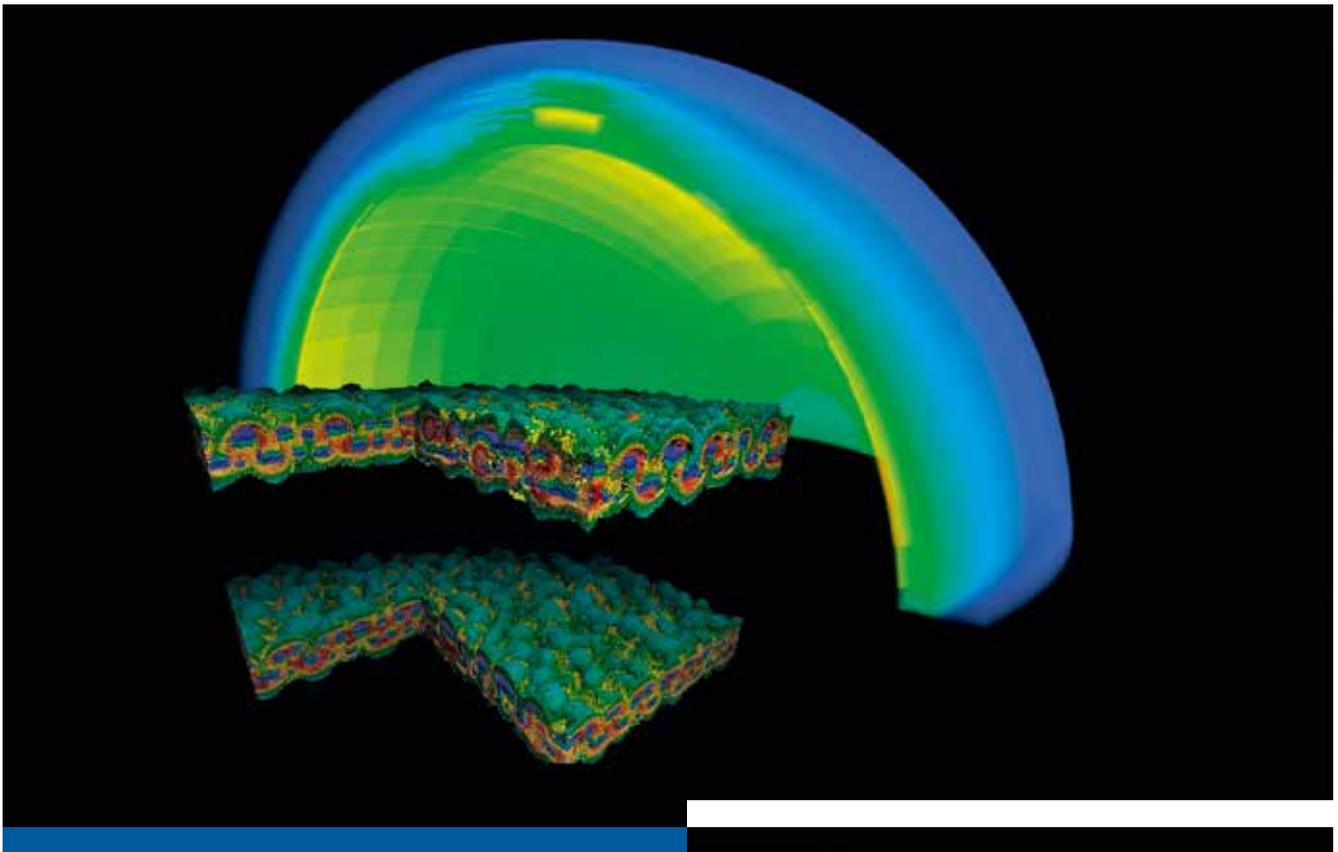
**BUBBLE-REGIME:** Die Simulation zeigt die Bewegung mehrerer hundert Millionen Teilchen unter dem Einfluss eines ultrakurzen, hochintensiven Lasers, der durch ein Gas von wenigen Millimeter Länge geschossen wird.

Die nötige Hardware, um seine persönlichen Herausforderungen der Zukunft zu meistern, hat sich Wolfgang Nagel bereits angeschafft. Damit kann sich der Leiter des Zentrums für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen (ZIH) an der Technischen Universität Dresden in neues Terrain vorwagen: Mit seinem funkelnagelneuen Fahrrad hat der Mathematik- und Informatik-Professor im letzten Sommerurlaub das Vento intensiv erkundet. Für den nächsten Urlaub fasst er steilere Anstiege ins Auge. Der gelernte Informatiker braucht die Herausforderungen, die teure und leistungsstarke Maschinen so mit sich bringen, wahrlich nicht zu scheuen.

In seinem Berufsleben sorgen Nagel und sein Team dafür, dass die Rechenmaschinen ausgelastet sind, die er seit fast zwanzig Jahren als Dienstleistung für die Forscher in Sachsen anschafft und nutzbar macht. Computer mit einer Rechenleistung, mit der in Deutschland nur wenige Rechenzentren mithalten können. Hinzu kommt nun das „Competence Center for Scalable Data Services and Solutions Dresden/Leipzig“

(ScaDS) – eines von bundesweit zwei Kompetenzzentren, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung in den nächsten vier Jahren mit fünf Millionen Euro finanziert. Ziel ist es, in Deutschland die Herausforderungen zu bewältigen, die mit dem Umgang mit großen Datenmengen einhergehen – von der eigentlichen Datenaufnahme über die Verwaltung bis hin zur Analyse.

Nach Dresden kam Nagel 1997 vom Forschungszentrum Jülich, wo er schon 1987 einen Supercomputer mit aufgebaut hatte. 1,5 Millionen Euro akquirierte Nagel damals für den Aufbau eines Zentrums für Hochleistungsrechnen vom Land Sachsen. Aber die Nachfrage nach Rechenzeit aus den wissenschaftlichen Instituten Dresdens war so groß, dass das Rechenzentrum bereits 2004 mit 15 Millionen Euro ausgebaut werden musste. Inzwischen sind hier 150 Spezialisten beschäftigt. 70 davon unterstützen Forscher aus der gesamten Region dabei, die Computer des Rechenzentrums für ihre Experimente optimal zu nutzen. Viele dieser Forscher arbeiten entweder an der TU Dresden selbst oder bei einem der außeruniversitären Partner von DRESDEN-concept, einem Verbund, der das Ziel verfolgt, Dresden als exzellenten Wissenschaftsstandort sichtbar zu machen. →



**VISUALISIERUNG:** Simulation astrophysikalischer Jets – im Vordergrund die turbulente Dynamik der Elektronen an der Grenzfläche zwischen Jet und umgebendem Gas. Dahinter leuchtet die Abstrahlung der Elektronen in verschiedenen Farben des Spektrums.

### Ein glücklicher Dienstleister

Während sich so mancher Wissenschaftler ungern vor den Karren der Projekte anderer spannen lässt, bezeichnet sich Nagel selbst als einen „glücklichen Dienstleister“. „Ich bekomme viele Anregungen für informationstechnische Forschungsprojekte aus den Problemen, mit denen Anwender zu uns kommen.“ Und oft ähneln sich die Schwierigkeiten, die Biologen, Physiker oder Ingenieure mit ihren Daten oder Rechenoperationen haben. „Wir haben am ZIH zum Beispiel ein universelles Paket von Werkzeugen entwickelt, wie man bei Rechenoperationen in hochkomplexen Systemen ermitteln kann, wo sie vielleicht zu langsam sind und wie man sie beschleunigen kann“, sagt Nagel, der sich schon mit „Big Data“ beschäftigt hat, als es den Begriff noch gar nicht gab.

2003 beantragte er für die TU Dresden die nötige IT-Infrastruktur für das datenintensive Rechnen. „Es gab zwar einige Supercomputing-Zentren für die Modellierung und Simulation komplexer Systeme, aber keine, die sich mit den großen Datenmengen beschäftigten, die zum Beispiel in der Genomforschung anfallen.“ Dabei ist nicht nur die Größe oder Menge der Daten eine Herausforderung, sondern auch ihre Komplexität oder schnelle Veränderlichkeit. Bei mikroskopischen

Untersuchungen entstehen zum Beispiel mitunter 150.000 Bilder pro Tag, jedes einzelne mehrere Megabyte groß. „Das Dresdner Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik hat täglich eine große Zahl von Filmen generiert“, sagt Nagel. Zunächst mussten Doktoranden ununterbrochen notieren, was in jedem einzelnen zu sehen ist. „Heute läuft das weitgehend automatisch. Trotzdem müssen wir noch schneller werden.“ Für ein Projekt, bei dem es um die Aufnahme bestimmter Medikamente und anderer Stoffe in Zellen ging, brauchten die Forscher ein Rechensystem, das diese Daten sehr schnell einlesen und lange im Hauptspeicher halten kann, um sie dort mit anderen Daten zu vergleichen. →

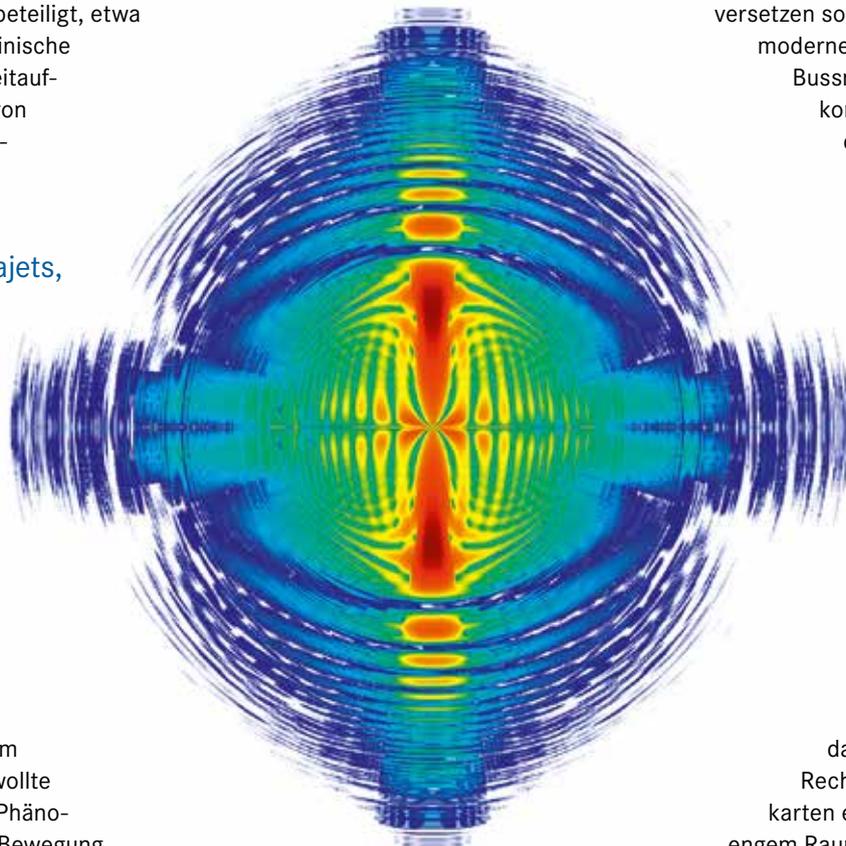


**VORDENKER:** Wolfgang Nagel. Foto: Lothar Sprenger

„Allein das Laden der Daten hätte mit den damaligen Systemen vier Monate gedauert“, sagt Nagel. „Meine Idee war, ein System mit einem großen Hauptspeicher zu bauen und alle Daten auf einmal zu laden und vorzuhalten – innerhalb von acht Minuten, nicht Monaten.“ Inzwischen nutzen selbst Firmen wie SAP diesen Trick für die Analyse von Geschäftsdaten – und verdienen Millionen. „An Businessdaten habe ich damals gar nicht gedacht, ich hatte nur die Lösung des Problems der stetig wachsenden Daten aus der Forschung vor Augen“, lacht Nagel. Im neuen Big-Data-Kompetenzzentrum ScaDS, das Nagel in Kooperation mit der Universität Leipzig und weiteren Partnern betreibt, wollen die Informatiker Lösungen für Probleme in den Lebenswissenschaften, den Materialwissenschaften, Umwelt, Klima, Verkehr, Wirtschaft und den so genannten Digital Humanities – den Geistes- und Sozialwissenschaften – entwickeln. Auch das HZDR ist als assoziierter ScaDS-Partner am interdisziplinären Austausch von Methoden und an der Förderung gemeinsamer Lösungsansätze für die Analyse großer Datenmengen beteiligt, etwa wenn es um die medizinische Bildgebung oder die zeitaufgelöste Tomographie von komplexen Strömungsgemischen geht.

### Kosmische Plasmajets, irdische Lösungen

Ob im Mikrokosmos, im Verkehrschaos direkt vor der Tür oder in fernen Galaxien – Supercomputer können die unterschiedlichsten Phänomene lösen helfen. Michael Bussmann vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf wollte ein „ganz klassisches Phänomen“ analysieren, die Bewegung von Milliarden von Elektronen in sogenannten Plasmajets, Fontänen von Teilchen, wie sie aus Sternen in entfernten Galaxien schießen. Ähnlich wie sich in der Gischt von Wellen Wasser mit Luft mischt,



**SIMULATION:** „Sky-Map“ des Lichts, das Elektronen in astrophysikalischen Jets abstrahlen, wenn sie sich in den turbulenten Bereichen der Schicht zwischen Jet und umgebendem Gas bewegen.

mischen sich die Gasteilchen aus dem Plasmajet eines Sterns mit anderen Gasteilchen. Bislang haben Forscher solche Turbulenzen, auch Kelvin-Helmholtz-Instabilität genannt, nur anhand weniger hundert Teilchen berechnen oder simulieren können. Doch das spiegelt nicht annähernd wider, was in der Realität passiert. „Deshalb haben wir etwas gemacht, was bisher kaum jemand versucht hat“, erklärt Bussmann. „Wir haben einen Plasmajet mit einer so hohen Auflösung simuliert, dass wir den Elektronen im Jet, also rund hundert Milliarden Teilchen, folgen konnten.“ Die für den PIconGPU genannten Simulationscode benötigte Rechenkraft stellten zunächst die Rechenzentren des HZDR und der TU Dresden zur Verfügung.

### Das Wesentliche aus der Datenmasse

So wie die Gangschaltung eines Fahrrads erst steile Bergfahrten möglich macht, versetzen sogenannte GPUs in den modernen Supercomputern Bussmann in die Lage, derart komplexe Simulationen durchzurechnen. GPUs sind Grafikkarten, die zwar nicht unbedingt schneller als herkömmliche Prozessorchips (CPUs) sind. Aber Grafikkarten können sehr viele Rechenoperationen parallel durchführen, über 2.000 nebeneinander auf einer Karte. Dadurch ist man oft zehn Mal schneller. „Ein Vorteil ist auch, dass sich eine große Rechenleistung mit Grafikkarten energieeffizient und auf engem Raum konzentrieren lässt“, sagt Uwe Konrad, Leiter des Rechenzentrums am HZDR, in dem mehrere Schränke voller Grafikkarten stehen. „Das eröffnet die Möglichkeit, einen Supercomputer nah an einem Experiment einzurichten, ohne dass man die umfangreichen Daten zur Auswertung erst in ein weit entferntes Rechenzentrum transportieren muss.“ Forschern jedenfalls ermöglichen Simulationen, das von ihnen betrachtete Phänomen in höchster Auflösung zu analysieren und dabei einzelne Bewegungen von allen Seiten und in 3D anschauen zu können – was im Falle des Nachwuchsgruppenleiters Bussmann mit keinem Teleskop der Welt möglich wäre. „Das ist die Art, wie man Big-Data-Wissenschaft machen muss“, sagt er. „Aus einer riesigen Datenmenge jederzeit herausfiltern zu können, was wichtig ist.“ →

Um zu überprüfen, ob die Simulation der Realität entspricht, musste der Code allerdings so erweitert werden, dass das von den einzelnen Teilchen abgestrahlte Licht in jeweils hundert Richtungen berechnet werden kann. „Denn das abgestrahlte Licht können wir mit etwas Glück mit Teleskopen von der Erde aus sehen.“ Der dafür benötigte Rechenaufwand überstieg jedoch die Dresdner Kapazitäten. Bussmanns Team hatte Glück und konnte den damals rechenstärksten Supercomputer der Welt, TITAN, am Oak Ridge National Laboratory nutzen und genug Rechenleistung herausholen, um unter die sechs Finalisten des Gordon Bell-Preises für Supercomputing 2013 zu kommen. So weit entfernt Plasmajets auch sein mögen, Bussmanns Nachwuchsgruppe kann mit dem Simulationscode auch ganz irdische Probleme analysieren, beispielsweise das Verhalten von Teilchen in lasergetriebenen Strahlungsquellen, die derzeit von den Physiker-Kollegen am HZDR für die Krebstherapie mit Protonen entwickelt werden. Deshalb sieht der IT-Leiter Uwe Konrad eine Stärke des Big-Data-Kompetenzzentrums darin, dass man in Dresden – unabhängig von den wissenschaftlichen Themen – gemeinsam Methoden entwickelt, um der großen Datenmengen Herr zu werden. „Dann ergeben sich manchmal unerwartete Zusammenhänge zwischen so unterschiedlichen Disziplinen wie der Plasmaphysik und der medizinisch-biologischen Bildgebung.“

Seit 2009 insistiert Wolfgang Nagel: „Was Dresden jetzt braucht, ist ein Zentrum für Softwareentwicklung.“ Das sei der Bereich, wo in Zukunft Wertschöpfung möglich sei. „Noch gibt es in Deutschland kein solches Zentrum, das 500 Experten unter einem Dach zusammenbringt“, sagt Nagel. Ihm schwebt

**TALENTIERT:** Mitglieder der Nachwuchsgruppe „Computergestützte Strahlenphysik“ unter Leitung von Michael Bussmann (1.v.r.).  
Foto: Oliver Killig



**EFFIZIENT:** Bei der Erweiterung des Rechenzentrums am HZDR wurde besonders auf die Energieeffizienz geachtet.

ein Kristallisationspunkt vor, an dem die Industrie nicht nur an Software-Lösungen für Logistik-, Robotik- oder Materialverarbeitungsprobleme gemeinsam mit Forschern und Entwicklern der Institute arbeitet. Die Firmen werden dann um das Softwarezentrum herum auch Zweigstellen in Dresden eröffnen, um Fachkräfte an sich zu binden, die in Dresden ausgebildet werden, ist sich Nagel sicher. „Wenn Experten aus verschiedenen Bereichen in diesem Gebäude erst zusammen Kaffee trinken und ins Gespräch kommen, dann werden Ideen und Lösungen entstehen, die wir uns heute noch gar nicht vorstellen können.“ Dafür wird das neue Lehmann-Zentrum der TU Dresden als IT-Zentrum für „Integrated Engineering“ geschaffen. „Ich bin überzeugt, das wird Dresden an die Spitze katapultieren.“ —

#### PUBLIKATIONEN:

M. Bussmann, H. Burau, T. Cowan, A. Debus, A. Huebl, G. Juckeland, T. Kluge, W.E. Nagel, R. Pausch, F. Schmitt, U. Schramm, J. Schuchart, R. Widera: „Radiative signatures of the relativistic Kelvin-Helmholtz Instability“, in Proceedings SC13: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis 2013

J. Dongarra, P. Beckman, T. Moore, P. Aerts, G. Aloisio, J.C. Andre, D. Barkai, J.-Y. Berthou, T. Boku, B. Braunschweig u.a.: „The international exascale software project roadmap“, in: International Journal of High Performance Computing Applications 2011 (DOI: 10.1177/1094342010391989)

#### KONTAKT

— Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen (ZIH)  
an der TU Dresden  
Prof. Wolfgang E. Nagel  
Sekretariat: zih@tu-dresden.de

— Abteilung Informationstechnologie | Institut für Strahlenphysik am HZDR  
Dr. Uwe Konrad | Dr. Michael Bussmann  
u.konrad@hzdr.de | m.bussmann@hzdr.de

// Wolfgang Enghardt ist Professor an der TU Dresden, Gruppenleiter am OncoRay-Zentrum und Abteilungsleiter am HZDR. Seit vielen Jahren interessiert ihn der Einsatz von bildgebenden Verfahren in der Krebsforschung und -therapie. 25 Jahre nach dem Mauerfall erinnert sich der ostdeutsche Medizinphysiker an den Beginn der Zusammenarbeit mit einem Helmholtz-Zentrum im Westen der Republik.

## ERINNERUNGEN AN DEN HERBST 1989

\_TEXT . Wolfgang Enghardt



Foto: OncoRay/  
André Wirsig

Mit einem Reisepass der DDR überquerte ich am 15. Oktober 1989 zum ersten Mal in meinem Leben die innerdeutsche Grenze – in einem Zug auf dem Weg zur Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt. Damals war ich mir sicher, dass ich die Rückfahrkarte niemals benutzen würde.

Wie kam es zu dieser Reise, die ich mit vier Kollegen aus dem Zentralinstitut für Kernforschung (ZfK) – einem Vorgänger des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf – antrat? Als im Frühjahr 1989 nach Kooperationsprojekten mit der GSI gesucht wurde, um das Abkommen über wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit zwischen den beiden deutschen Staaten mit Leben zu füllen, habe ich laut „hier“ gerufen. Denn drei meiner Kollegen und ich hatten uns im selben Jahr bereits mit dem Vater der modernen Ionentherapie, Gerhard Kraft von der GSI, im Zentralinstitut für Krebsforschung in Berlin-Buch getroffen.

Zusammen entwarfen wir den Plan, eine in Rossendorf entwickelte Kamera, mit der sich Positronen detektieren lassen, an den Ionenstrahl der GSI zu bringen. Unser Ziel: Eine Methode zu erarbeiten, die es ermöglicht, die Reichweite der Ionenstrahlen in lebenden Organismen mit Hilfe der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) zu messen. Gerhard Kraft hatte für diese Idee von allen PET-Zentren der Bundesrepublik eine Absage erhalten, da es nicht funktionieren könnte. Wir waren uns dagegen sicher, dass es funktionieren müsse, was ja schließlich auch zutraf.

Nur knapp zwei Jahre später gelang es uns, am Schwerionensynchrotron der GSI das allererste Experiment durchzuführen, bei dem wir den Positronen-Emitter Neon-19 erzeugen, in einen Plexiglasblock schießen und davon PET-Bilder aufnehmen konnten. Damit begann die Entwicklung der Partikeltherapie-PET, von der heute Medizinphysiker sagen: „It was pioneered in Dresden.“ Das ist allerdings nur die halbe Wahrheit: Alle wichtigen Experimente dazu erfolgten am Strahl der GSI-Beschleuniger.

Während wir also tagsüber intensiv arbeiteten, verfolgten wir abends in der Küche der GSI-Gästebarracke im Fernsehen die Ereignisse in der DDR. Ich zog daraus die Schlussfolgerung, dass es wohl nicht mehr lange dauern würde, bis Deutschland wieder vereinigt wäre. Eine Annahme, die meine Kollegen noch belächelten. Konsequenterweise benutzte ich schließlich am 29. Oktober 1989 meine Rückfahrkarte von Darmstadt nach Dresden.

Wohl vom Interesse getrieben, ob wir das vorgeschlagene in-beam PET-Experiment durchführen können, besuchten uns am 8. November 1989 die GSI-Forscher Gottfried Münzenberg und Dieter Schardt in Rossendorf. Sie waren offenkundig mit dem Gesehenen zufrieden. Den Abend des 9. November 1989 verbrachten wir mit Dieter Schardt in einer Gaststätte in Dresden. Wir haben uns gegen 22 Uhr mit vielen Plänen im Kopf verabschiedet. Ich fuhr nach Hause, wo ich meine Frau, wie gebannt vorm „Westfernsehen“ sitzend, antraf. In diesem Augenblick wusste ich, dass es nun eine reale Chance gab, unsere Ideen umzusetzen und dass es richtig war, die Rückfahrkarte zu nutzen. —



### KONTAKT

\_Nationales Zentrum für Strahlenforschung  
in der Onkologie – OncoRay /  
Institut für Radioonkologie am HZDR  
Prof. Wolfgang Enghardt  
wolfgang.enghardt@oncoray.de

// Auf rund 186 Hektar erstreckt sich am östlichen Stadtrand Dresdens der Campus des HZDR – immerhin eine Fläche fast so groß wie Monaco. Anders als im dichtbebauten Fürstentum fügen sich die Gebäude des Rossendorfer Forschungszentrums aber in den umliegenden Wald harmonisch ein. „entdeckt“ hat sich mit dem Kaufmännischen Direktor, Peter Joehnk, über die weitere Entwicklung des Standortes unterhalten.



Foto: Jürgen-M. Schülter / dresden-luftfoto.de

## GROSSFORSCHUNG IM GRÜNEN

Interview: Simon Schmitt

### Herr Joehnk, im Jahr 2002 hat der Vorstand des HZDR einen Masterplan aufgestellt. Warum?

Nach der Neugründung des Zentrums 1992 war der Großteil der Infrastruktur fast 40 Jahre alt. Alles erfüllte zwar seine Funktion, eine Sanierung und Modernisierung war aber dringend notwendig, um langfristig konkurrenzfähig zu bleiben und um gesetzliche Anforderungen, zum Beispiel beim Brandschutz, einzuhalten. Dieser Prozess lief bis 2002 ohne erkennbares Konzept ab, was zwangsläufig zu Problemen führte. So spiegelte sich beispielsweise in den Elektro-Unterverteilungen am Standort fast die komplette Angebotspalette des Marktes wider, was im Hinblick auf Kosten für Wartung und Betrieb eines solchen Flächenstandortes nicht tolerabel war. Im Masterplan nahmen wir den gesamten Campus in den Blick und entwickelten darüber hinaus einen „Rossendorfer Standard“. Auf dieser Grundlage gelang es uns, den Altgebäudebestand einheitlich innerhalb von etwa zehn Jahren beinahe komplett zu sanieren.

### Was ist der „Rossendorfer Standard“?

Er ist vor allem für Planer und Architekten eine Leit- und Orientierungshilfe. In ihm haben wir Ausrüstungs- und Gestaltungsrichtlinien für alle Bau- und Ausbuarbeiten am Standort festge-

legt, um sicherzustellen, dass Lebenszykluskosten für Gebäude und Ausstattungen berücksichtigt werden und um dem Campus ein einheitliches Gesicht zu verleihen. Deswegen konzentrieren wir uns neben den wirtschaftlichen Aspekten auch auf Fragen der Ästhetik und besonders der Nachhaltigkeit.

### Warum dieser gesamtheitliche Blickwinkel?

Aufgrund seines Standortes ist unser Campus bereits seit der Gründung 1956 außergewöhnlich. Mitten im Wald gelegen, müssen wir besondere Rücksicht auf unsere Umgebung neh- →

GEPFLEGT: Die Kantine des HZDR



men. So sind zum Beispiel „unsere Nachbarn“ artgeschützte Tiere und schützenswerte Pflanzen. Deshalb sind alle Bauvorhaben darauf ausgerichtet, die Beeinträchtigungen für die Natur möglichst gering zu halten.

#### ■ Haben Sie dafür ein konkretes Beispiel?

Natürlich. Das zeigt sich beispielweise in unserer Straßenbeleuchtung. Durch eine Untersuchung, die ein Student der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden im Rahmen seiner Diplomarbeit für uns durchgeführt hat, konnten wir herausfinden, welche Fledermausarten es hier gibt. Anhand der Daten haben wir einen geeigneten Lampentyp sowie die optimalen Aufstell- und Abstrahlwinkel gewählt, um die Tiere weniger zu stören. Außerdem haben wir dadurch festgestellt, dass wir auf jede dritte Leuchte verzichten können, was natürlich zu Strom- und Kosteneinsparungen führte. So konnten wir sowohl einen ökologischen als auch einen ökonomischen Nutzen ziehen. Gleichzeitig haben wir einen Studenten auf seinem Karriereweg unterstützt.

#### ■ Gibt es weitere Maßnahmen im Masterplan, die zum Bereich der Nachhaltigkeit gehören?

An sich stand der Masterplan von Anfang an unter dem Zeichen der Nachhaltigkeit. Bei den Sanierungsarbeiten haben wir darauf geachtet, die bestehende Infrastruktur ressourceneffizienter zu gestalten. Durch moderne Dämmvorrichtungen konnten wir bei vielen Gebäuden Wärmeeinsparungen von 55 bis 70 Prozent erzielen. Den CO<sub>2</sub>-Ausstoß für die Wärme- und Energieerzeugung konnten wir deutlich verringern, indem wir unsere Wärmeversorgung mit einer eigenen Energiezentrale decken. Dafür haben wir ein Blockheizkraftwerk aufgebaut. Eine große Geothermie-Anlage übernimmt allein die Wärme- und Kälteversorgung eines rund 5.000 Quadratmeter großen Gebäudekomplexes. Im Sommer können wir dadurch einen Teil der Wärme ins Erdreich zurückführen und so einen Energievorrat für die nächste Heizperiode anlegen. Als weiteren Abnehmer haben wir für das Blockheizkraftwerk eine Absorptionskälteanlage eingerichtet, die den Serverraum des Rechenzentrums mit Kühlung versorgt. Energieverbrauch und Kosten konnten wir dank dieser Maßnahmen stark verringern.

**NATUR:** Harthteich auf dem Campus



#### ■ Was steht nun für die nächste Periode von 2015 bis 2020 an?

Hauptsächlich dreht sich die Fortschreibung des Masterplans um die Frage der Zukunftssicherung. Das HZDR ist in den vergangenen zwölf Jahren auf die doppelte Größe an Mitarbeitern gewachsen. Nun geht es vor allem um die Möglichkeiten für die weitere Entwicklung. Sollten wir weiterhin wachsen, müssen wir das auch mit Neubauten und einem Ausbau der Infrastruktur abdecken. Das Problem ist hier das Baurecht. Da bislang kein Bebauungsplan für unseren Standort besteht, müssen wir für jedes Bauvorhaben mit der Stadt Dresden eine neue Genehmigung aushandeln. Wir wollen deshalb mit dem Planungsamt einen Bebauungsplan aufstellen, um für die Zukunft Planungssicherheit für weitere Ausbaumaßnahmen zu schaffen.

#### ■ Gibt es noch weitere Themen?

Im kommenden Jahr laufen wasserrechtliche Genehmigungen aus. Wir haben deshalb ein neues Konzept entworfen, wie sich das Niederschlagswasser sinnvoll nutzen lässt. Ein Teil soll am Standort versickern. Bei Starkregenereignissen soll das Überschusswasser auf unserem Campus in den Harthteich eingeleitet werden. Dies unterstützt zum einen das Mikroklima. Zum anderen leisten wir einen Beitrag zum Hochwasserschutz für die tieferliegenden Siedlungen.

Die Arbeitsgruppe für Gesundheitsmanagement entwickelt außerdem ein Konzept, um die Nutzungsmöglichkeiten des Waldes für kreative Pausen und körperliche Aktivitäten auszuloten.

#### ■ Sind neue Bauvorhaben vorgesehen?

Wir schließen zunächst die Sanierungsmaßnahmen ab. 85 Prozent sind bereits erledigt. Bis 2017/18 müssen die restlichen Gebäude auf einen gesetzeskonformen, modernen Stand gebracht werden. Außer den laufenden Bauvorhaben DRES-DYN, TOPFLOW-Halle und Zentrum für radiopharmazeutische Tumorforschung sind bis dahin keine neuen Projekte geplant – aber was heißt das schon für eine Forschungseinrichtung, an der jeden Tag neue Dinge geschehen.

Für unser Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie ist die Errichtung einer neuen Technologiehalle zwingend erforderlich. Wir hoffen, dass wir mit diesem Vorhaben im Jahr 2015 starten können. Und schließlich haben wir noch die Sanierungsarbeiten am Standort Leipzig, die uns ebenfalls im nächsten und übernächsten Jahr begleiten werden. —



#### KONTAKT

\_Kaufmännischer Direktor des HZDR  
Prof. Peter Joehnk  
p.joehnk@hzdr.de

// Theoretische Grundlagen in Deutschland, angewandte Forschung in China: Der Physiker Xin Ou will diese beiden Welten verbinden und damit eine Brücke zwischen dem Ionenstrahlzentrum am HZDR und dem chinesischen SIMIT-Institut (Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology) schlagen.

## ÜBER ALLE GRENZEN HINWEG

Text . Christine Bohnet

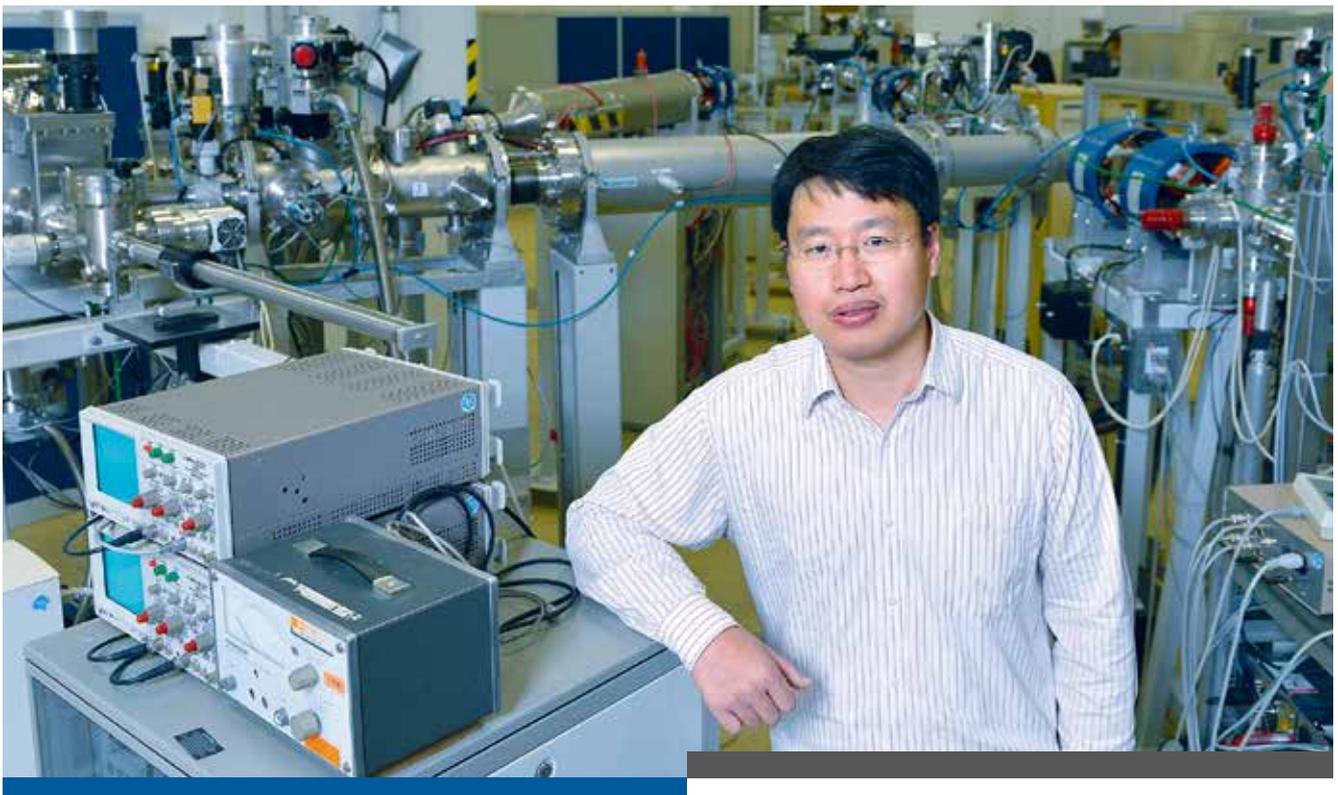
Geschichten über Kooperationen sind vor allem Geschichten von Menschen. Menschen wie beispielsweise dem chinesischen Physiker Xin Ou, den es 2007 im Rahmen eines gemeinsamen Promotionsprogramms zwischen dem HZDR und dem SIMIT-Institut der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in die sächsische Landeshauptstadt zog. Auch nach seiner erfolgreich absolvierten Promotion 2009 ist er noch lange geblieben, zusammen mit seiner Frau und den beiden in Dresden geborenen Kindern.

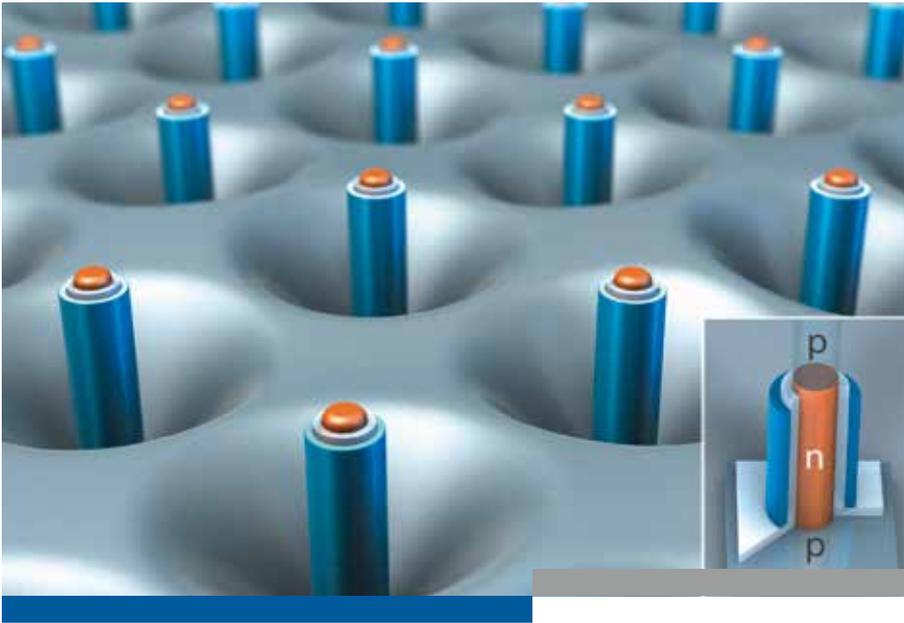
„In der Siedlung Rossendorf gefällt es uns sehr gut und wir leben hier schon sieben Jahre. Ich mag das ruhige Leben und das riesige Waldgebiet, in dem ich jeden Tag jogge. Meine Frau hat hier Deutsch gelernt und die Nachbarn sind sehr

nett“, schwärmt der 33jährige Wissenschaftler von dem fast dörflichen Leben jenseits der Bundesstraße 6, die das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf von der Siedlung Rossendorf trennt.

Nicht nur den Wald wird Xin Ou vermissen, wenn er nach China zurückkehrt, sondern auch die enge Zusammenarbeit zwischen Theoretikern und Experimentatoren im Ionenstrahlzentrum des HZDR. Ende 2014 jedenfalls will er eine Stelle bei der Chinesischen Akademie der Wissenschaften antreten, die ihm eine Professur im „100-Talente-Programm“ anbietet. Versüßt wird ihm der Wechsel aus der kleinen Siedlung in die Mega-City Shanghai durch attraktive Angebote: Neben Unterstützung für seine Forschung sind dies eine Wohnung mit günstigen Mietkonditionen, Hilfe bei der Suche nach Kindergartenplätzen und ein Stellenangebot für seine Frau, der in China mit einem Masterabschluss in Englisch und ihren sehr guten Deutschkenntnissen viele Türen offen stehen. →

**AUS ZWEI ROHREN:** Der Physiker Xin Ou an der Doppel-Implantationskammer. Hier können Proben gleichzeitig mit hoch- und niederenergetischen Teilchen behandelt werden.  
Foto: Matthias Rietschel





**HOCH STATT FLACH:** Silizium-Wafer mit neuartigen Säulen-Transistoren aus Silizium-Nanodrähten (ohne oberen p-Kontakt). Schema: Sander Münster

## Ausgezeichnete Einblicke in Nano-Drähte

In seinem Reisegepäck wird unter anderem eine Urkunde stecken, auf der steht: „Dr. Xin Ou erhält den Forschungspreis des HZDR 2010 für seine Arbeit zur Charakterisierung von Nano-Drähten“. Dabei handelte es sich um Drähte aus Silizium, die eine völlig neue Chip-Architektur ermöglichen könnten, etwa indem sie in einem Siliziumtransistor nicht flach, sondern wie viele winzig kleine Türme nebeneinander angeordnet werden. Gemeinsam mit Kollegen im HZDR-Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung sowie vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle gelang es Xin Ou, den elektrischen Widerstand und den bis dahin unbekanntem Stromfluss im Inneren von Silizium-Nanodrähten darzustellen. Die Ergebnisse erschienen damals in der Fachzeitschrift „Nano Letters“. Mittlerweile enthält die Publikationsliste Xin Ous 35 Eintragungen für wissenschaftliche „Paper“, zwei Buchkapitel, 32 Konferenz-Beiträge und sieben Patente.

Kein Wunder also, dass sich auch die Liste der Auszeichnungen nicht auf den Forschungspreis des HZDR erschöpft. Im japanischen Kyoto erhielt Xin Ou den Nachwuchspreis der Internationalen Konferenz für Ionenimplantation 2010 und seine Doktorarbeit brachte ihm den Preis „Exzellente Promotion“ der Chinesischen Akademie der Wissenschaften ein – um nur zwei weitere Ehrungen zu nennen.

Für den dekorierten Physiker ist klar, dass er seine Erfolge auch seinem Umfeld verdankt. „Am HZDR habe ich von den sehr guten Arbeitsbedingungen im Ionenstrahlzentrum und dem kooperativen Miteinander profitiert. Das SIMIT ist, wie ich selbst, eher experimentell ausgerichtet. Die Unterstützung durch die vielen Experten auf dem Gebiet der Simulation von Ionenstrahl-Prozessen und der Charakterisierung von

Materialien wird mir dort fehlen“, so der Physiker. Deshalb ist ihm eine Zusammenarbeit mit dem Ziel, dauerhafte Drähte zwischen Kollegen in China und Deutschland zu etablieren, besonders wichtig. Und er freut sich, wenn sich daraus enge Freundschaften entwickeln wie beispielsweise mit seinem Kollegen Reinhard Kögler, Betreuer der Doktorarbeit und Mit-Autor einiger seiner vielen wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

## Ausbaufähige Beziehungen schaffen

Der SIMIT-Direktor Xi Wang, eines der jüngsten Akademiemitglieder in China, war Hauptbetreuer der

Promotion Xin Ous. Die Geschichte zwischen SIMIT und dem HZDR reicht jedoch weiter zurück in die Vergangenheit – bis in die Zeit direkt nach der Wende. Im Jahr 1993 erhielt der Physiker Xianhuai Liu, der wiederum die Doktorarbeit des heutigen SIMIT-Direktors betreut hatte, eine Einladung an das Dresdner Ionenstrahlzentrum, das er noch im gleichen Jahr besuchte. So ebnete er den Weg für Xi Wang, der später als von der Alexander von Humboldt-Stiftung geförderter „Fellow“ an das HZDR kam.

Direktor Wang ist es zu verdanken, dass sich die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Mikro- und Nanoelektronik zwischen Shanghai und Dresden intensiviert hat. Ein kluger Schachzug jedenfalls war die Entsendung seines strebsamen Doktoranden Xin Ou an das HZDR. Nach knapp acht Jahren in Dresden nimmt dieser nun viele Ideen und Vorschläge für zukünftige Zusammenarbeitsthemen nach Shanghai mit. „Deutschland und China arbeiten in der Wirtschaft eng zusammen und ich bin überzeugt, dass auch die Kooperationen in der Wissenschaft wachsen werden“, gibt sich der chinesische Forscher optimistisch. Vorbild könnte die fruchtbare Zusammenarbeit sein, die das Forschungszentrum Jülich seit Jahren mit dem SIMIT-Institut in Shanghai pflegt.

## Ionen als Zukunftstechnologie

Gerade das Gebiet der Ionenstrahlphysik ist nach Xin Ous Überzeugung besonders geeignet, um es in China weiter auszubauen und gemeinsam neue Felder zu erschließen. Ionenstrahlen – also schnelle, elektrisch geladene Atome – sind ein unverzichtbares Werkzeug für die Materialforschung, denn mit ihnen lassen sich die elektronischen, optischen, magnetischen oder mechanischen Eigenschaften von Materialien maßschneidern. Xin Ou ist vor allem an Ionenstrahl-Prozessen für neue oder verbesserte Informationstechnologien interessiert. So arbeitete er während seiner Promotionszeit daran, den Fabrikationsprozess für das sogenannte „Silicon-on-Insulator“ („Silizium auf Isolator“) zu optimieren. Bei dieser

modernen Technologie befindet sich lediglich eine dünne Schicht des Halbleiters Silizium auf einem ansonsten isolierenden Material, wodurch sich die Taktraten der Schaltkreise merklich erhöhen und die Verlustleistung verringert wird. Übrigens produziert GLOBALFOUNDRIES, einer der "Global Player" in der Mikroelektronik, genau diese Silizium-Technologie am Standort Dresden.

Gleich mehrere Zukunftsthemen kommen dem Physiker in den Sinn, wenn er an seine Arbeiten am HZDR denkt: Nano-Fabrikation mit Ionen, die Wirkung von Strahlung auf Werkstoffe und Bauteile oder die Weiterentwicklung von „Silicon-Insulator“ (SOI) hin zu beliebigen Halbleitern auf Isolatormaterialien. Hierbei reizt ihn die Problemstellung, wie man prinzipiell Material und Energie bei der Produktion von Wafern einsparen könnte. Wafer heißen die dünnen Scheiben,



**NANO-FABRIKATION:** Xin Ou prüft die Temperatur, die je nach Material zwischen 200 und 600 Grad Celsius liegen kann. Bei gleichzeitigem Beschuss mit niederenergetischen Teilchen entstehen die gewünschten Nanostrukturen. Foto: Matthias Rietschel

auf denen die Mikroelektronik-Industrie die Chips anordnet, bevor sie geschnitten und in Kameras, Handys oder Computer eingebaut werden. Energieeffizient wäre, in Zukunft nur hauchdünne Wafer zu verwenden, die fest mit einem dickeren Substratmaterial verbunden sind. Klingt einfach, erfordert aber wegen der unterschiedlichen Gitterstrukturen der Halbleiterkristalle noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Als Schneidwerkzeug könnten wiederum Ionen zum Einsatz kommen, die zunächst wohldefinierte Defekte in einem Halbleiter-Wafer erzeugen. Wenn dieser in einem zweiten Schritt erhitzt wird, soll sich eine mechanische Spannung aufbauen, die dazu führt, dass viele einzelne Wafer-Scheiben mit den gewünschten Eigenschaften und mit einer kontrollierten Dicke im Nano- bis Mikrometerbereich entstehen. Jeweils ein solch dünner Wafer wird schließlich mit einem dickeren Isolator- oder Silizium-Substrat verbunden.

## Selbstorganisierte Nano-Strukturen

Dieses „Smart Cut“ genannte Verfahren befindet sich für SOI-Wafer bereits im Einsatz, doch der visionäre Materialforscher möchte es zu einer generellen Technologie für den sparsamen Einsatz von zusammengesetzten Halbleiter-Wafern in der

Mikro- und Optoelektronik oder für Hochleistungsbauteile weiterentwickeln. „Auch neue Wege der Nano-Fabrikation möchte ich gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum und SIMIT gehen. Dieses Thema hat mich und meinen Dresdner Kollegen Stefan Facsko in der letzten Zeit sehr beschäftigt. Er hat die Berechnungen gemacht, ich die Experimente, allerdings ist es bis zur Industriereife noch weit“, berichtet Xin Ou. Sicherheitshalber reichten die beiden Physiker für ihr ausgeklügeltes Procedere aber bereits ein Patent ein.

Um auf einer Halbleiter-Oberfläche Nano-Strukturen zu erzeugen, setzen die HZDR-Forscher auf niederenergetische Ionen. Deren Vorteil: Sie dringen nicht allzu tief in das Material ein. Allerdings zerstören sie die Oberfläche des Halbleiter-Kristalls und damit auch seine besonderen Eigenschaften. Heizt man das Material jedoch während des Ionenbeschusses in geeigneter Weise auf, ordnen sich die entstandenen Leerstellen zu regelmäßigen Strukturen im Nanometer-Maßstab an (siehe Artikel auf Seiten 04 – 05). Der chinesische Physiker sieht für die Nano-Fabrikation mit Ionen ein großes Anwendungspotenzial: „Für niedrige Ionenenergien benötigt die Industrie keine großen Anlagen. Wenn es gelingt, die behandelten Oberflächen in einem kristallinen Zustand zu halten, lassen sich mit unserer Methode Silizium, Galliumarsenid und andere Halbleiter bearbeiten und mit geordneten Nano-Strukturen versehen.“

Da sich Xin Ou heute in beiden Welten – in Europa wie in Asien beziehungsweise in der grundlegenden wie angewandten Forschung – bestens auskennt, gewinnt das HZDR mit ihm einen hervorragenden Kooperationspartner in China. Er selbst hofft, dass er auf einem für März 2015 geplanten Treffen der Direktoren von SIMIT und Ionenstrahlzentrum viele seiner Dresdner Kollegen treffen wird. Bis dahin werden er und seine Familie sich in der Millionenstadt Shanghai wohl ein wenig eingelebt haben. —

## PUBLIKATIONEN:

X. Ou, A. Keller, M. Helm, J. Fassbender, S. Facsko: "Reverse epitaxy of Ge: ordered and faceted surface patterns", in *Physical Review Letters* 2013 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.016101)

X. Ou, P. D. Kanungo, R. Kögler, P. Werner, U. Gösele, W. Skorupa, X. Wang: "Three-dimensional carrier profiling of individual Si nanowires by scanning spreading resistance microscopy", in *Advanced Materials* 2010 (DOI: 10.1002/adma.201001086)

X. Ou, R. Kögler, A. Mücklich, W. Skorupa, W. Möller, X. Wang, L. Vines: "The use of nanocavities for the fabrication of ultrathin buried oxide layers", in *Applied Physics Letters* 2009 (DOI: 10.1063/1.3065478)

## KONTAKT

— Institut für Ionenstrahlphysik und Materialwissenschaft am HZDR  
Dr. Xin Ou  
x.ou@hzdr.de

↗ <http://english.sim.cas.cn/au/> (SIMIT - Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology)

## WISSENSWERT – NACHRICHTEN RUND UM DAS HZDR

### Nachwuchs in Dresden

Bereits zum dritten Mal in Folge nahmen internationale Masterstudenten aus Dresden mit großem Erfolg am „Harvard Biomolecular Design“-Wettbewerb (BIOMOD) in Boston teil. Die zwölf Studierenden vom Biotechnologischen Zentrum der TU Dresden gaben sich den treffenden Namen „Dresden DNAmic“, denn sie nutzen die DNA-Origami-Technik für die Herstellung eines optischen Nano-Schaltkreises aus Goldpartikeln. Damit landete das Team, das mit 29 anderen Teams an den Start ging, auf dem zweiten Platz. Traditionell unterstützt wurde es von den Gewinnern des Vorjahres, also auch von HZDR-Masterandin Gisela Gabernet Garriga. Die „Dresden Nanormous“ (2013) und die „Dresden Nanosaurs“ (2012) erreichten ebenfalls einen zweiten Platz.

➤ <http://biomod.net>

### Sommer am HZDR

Das war ein außerordentlich guter Jahrgang – so lautet die einhellige Meinung am HZDR, wenn es um die Teilnehmer der Sommerschule 2014 geht. Aus 29 Ländern und 255 Bewerbungen waren zwölf Studierende ausgewählt worden. Diese hielten sich im Durchschnitt sieben Wochen am HZDR auf, unterstützt durch einen persönlichen Betreuer und ein Stipendium. Neben Arbeit im Labor gab es Vorlesungen und organisierte Freizeit-Angebote. Etwa zwei Drittel der Sommerstudenten würde sich darüber freuen, später in Dresden weiterforschen zu können.

### Löten in den Herbstferien

Eigentlich war bei 20 Schluss, das Team vom Schülerlabor DeltaX machte jedoch eine Ausnahme, sodass insgesamt 21 Schülerinnen und Schüler die Ferien-Forscherwoche am HZDR besuchen konnten. Am Ende nahmen alle Teilnehmer neben einem selbst gebauten „Radio to go“ jede Menge neues Wissen mit nach Hause. Experimentierstationen im Schülerlabor und Besichtigungen der Forschungsanlagen wechselten sich ab mit eigenen Präsentationen und dem Arbeiten mit LötKolben und Schraubenzieher. Die Ferien-Forscherwoche ist ein kostenfreies Angebot für Mädchen und Jungs der siebten bis zehnten Klasse und findet regelmäßig in den Herbstferien statt.

➤ [www.hzdr.de/deltax](http://www.hzdr.de/deltax)



### Dresden im internationalen Jahr des Lichts

Das Jahr 2015 wurde von der UNESCO zum „Internationalen Jahr des Lichts und lichtbasierter Technologien“ ausgerufen. In diesem Jahr soll die Bedeutung des Lichts als elementare Lebensvoraussetzung für Menschen, Tiere und Pflanzen und somit als wesentlicher Bestandteil von Wissenschaft und Kultur hervorgehoben werden.

Dresden bietet als „Stadt des Lichts“ ein vielfältiges Programm an. Auf Initiative des Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik ist ein Experimentier-Parcours zum Licht der Zukunft in den Technischen Sammlungen Dresden geplant. Die Ausstellung „Hi Lights!“ öffnet am 19. Juni 2015. Das t.j.g. theater junge generation inszeniert dazu das Forschungstheater „Licht!“. Die Premiere in den Museumsräumen ist für den 27. Juni 2015 angesetzt. Das HZDR beteiligt sich vor allem an der Veranstaltungsreihe, die das Dresdner Lichtjahr begleitet.

➤ [www.dresdner-lichtjahr.de](http://www.dresdner-lichtjahr.de)



// In Dresden wird die Krebsforschung in den nächsten Jahren erheblich ausgebaut.

## STARTSCHUSS FÜR DIE BESTRAHLUNG MIT PROTONEN

Text . Christine Bohnet | Fotos . Matthias Rietschel



### Symbolischer Schnitt

Ein glücklicher Moment: Bundesforschungsministerin Johanna Wanka und Sachsens Ministerpräsident Stanislaw Tillich eröffnen am 22. August 2014 mit einem symbolischen Schnitt die Bestrahlungsanlage am Nationalen Zentrum für Strahlenforschung in der Onkologie – OncoRay. „Jeder mit der Protonentherapie behandelte Patient in Dresden wird in Studien eingeschlossen, um den Therapieerfolg wissenschaftlich überprüfen zu können“, so OncoRay-Direktor Michael Baumann (links).

„Die Krankenversorgung hat eigene Regeln, weshalb wir die Protonentherapie unter dem Dach der neu gegründeten ‚Universitäts Protonen Therapie Dresden‘ in der Klinik für Strahlentherapie und im OncoRay-Zentrum bündeln.“ Gemeinsam mit der Medizinischen Fakultät der TU Dresden und dem HZDR gehört das Dresdner Universitätsklinikum damit zu den weltweit nur 30 Einrichtungen, die diese innovative Form der Strahlenbehandlung anbieten.



### Präzisionstherapie

Der Bestrahlungsplatz für Patienten musste im Herbst 2014 nur noch die behördliche Abnahme durchlaufen. Der Behandlungsraum, zu dem ein computergesteuertes Therapietisch am Austrittsfenster des Protonenstrahls, die Steuereinheit sowie ein Computertomograph (CT) gehören, war zur Einweihung bereits voll funktionsfähig. Die eigentliche Bestrahlung dauert jeweils nur wenige Minuten, die Vorbereitung dagegen ist mit hohem Aufwand verbunden. Damit die Protonen ihre zerstörerische Wirkung nur im Tumor entfalten, wird ein fahrbares CT-Gerät eingesetzt (rechts), das bei jedem Patienten vor Bestrahlungsbeginn die exakte Lage des Tumors überprüft. Patienten und ihre behandelnden Ärzte können sich über eine eigens eingerichtete Telefon-Hotline direkt bei der „Universitäts Protonen Therapie Dresden“ über Behandlungsmöglichkeiten informieren.



Foto: Oliver Killig

## Zukunftsprojekt zwischen Dresden und Heidelberg

Ministerin Wanka und Ministerpräsident Tillich nutzten den gemeinsamen Termin, um eine langfristige Millionenförderung bekannt zu geben: Dresden wird zum zukünftigen Partnerstandort des „Nationalen Centrums für Tumorerkrankungen“ (NCT) in Heidelberg. Damit wird die enge Kooperation zwischen Dresden und dem Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) ausgebaut. Im Mittelpunkt soll die am Patienten orientierte Forschung zur „individualisierten Präzisionsonkologie“ stehen. Das heißt, dass jeder einzelne Patient eine auf seine individuelle Krebserkrankung zugeschnittene Therapie erhalten soll. „Dieses standortübergreifende Zukunftsprojekt zwischen Heidelberg und Dresden wird einen entscheidenden Beitrag zur Stärkung einer internationalen Spitzenposition Deutschlands in der Krebsforschung und Krebsmedizin leisten“, betonte Wanka.



## Echtzeit-Überwachung für die Protonentherapie

Der Teilchenstrahl gelangt im OncoRay-Gebäude nicht nur zum Patienten, sondern auch in eine Experimentierhalle. Dort wird unter Hochdruck an der Entwicklung einer Echtzeit-Überwachung für die Protonentherapie gearbeitet. Im Gegensatz zur Röntgenstrahlung, wie sie heute in der modernen Strahlentherapie hauptsächlich zum Einsatz kommt, bleiben die Protonen im Tumor stecken. Das bedeutet, dass man ihren Weg über im Körper ausgelöste Reaktionen verfolgen und bildlich darstellen muss. Solch eine neuartige Kamera ist das gemeinsame Ziel der Physiker im OncoRay-Verbund (im Bild v.l.n.r.: Guntram Pausch, Gruppenleiter am OncoRay, Roland Sauerbrey, Wissenschaftlicher HZDR-Vorstand, Wolfgang Enghardt, OncoRay-Sektionsleiter, HZDR-Abteilungsleiter, Professor an der TU Dresden).

### KONTAKT

\_ Nationales Zentrum für Strahlenforschung in der Onkologie – OncoRay  
Prof. Michael Baumann

➤ [www.oncoray.de](http://www.oncoray.de)

\_ Universitäts Protonen Therapie Dresden  
Hotline: 0351 458 15693  
montags bis freitags von 9 bis 11 Uhr und 13 bis 15 Uhr  
[protonentherapie@uniklinikum-dresden.de](mailto:protonentherapie@uniklinikum-dresden.de)



Foto: DMG/Dittrich

## IPAC14 gewinnt "Congress Award"

Die "International Particle Accelerator Conference", das Welttreffen für knapp 1.500 Beschleunigerexperten, fand im Juni 2014 in Dresden statt. Für die erfolgreiche Organisation und Durchführung nahm Peter Michel vom HZDR (4. v. r.) am 4. November den "Dresden Congress Award" entgegen. Mit diesem Preis würdigt Dresden engagierte Wissenschaftler, Unternehmer und Kongressveranstalter, also diejenigen, die Kongresse und Tagungen nach Dresden holen und erfolgreich über die Bühne bringen.

## Internationale Radiochemie-Experten in Dresden

Das HZDR lud im November zum 2. ATAS-Workshop ("Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy") ein. Neu an dem von Katharina Müller, Robin Steudtner und Satoru Tsushima vor zwei Jahren erstmals initiierten Treffen war ein Ringversuch, an dem 18 Labore weltweit teilnahmen. Wie

vergleichbar sind die unterschiedlichen spektroskopischen und theoretischen Methoden, mit denen sich die chemische Struktur, das Bindungs- und somit das Ausbreitungsverhalten von radioaktiven Schwermetallen (Actiniden) in der Umwelt aufklären lassen? Kann man sie miteinander kombinieren? In intensiven Diskussionen fanden die 80 Teilnehmer Antworten auf diese Fragen und kamen so dem Ziel, eine Brücke zwischen Theorie und Experiment zu schlagen, ein Stück näher.

## Radionuklide für die Medizin

175 internationale Radiochemiker bzw. Radiopharmazeuten reisten im August nach Prag, um am "15. Workshop on Targetry and Target Chemistry" (WTTC15) teilzunehmen. Gemeinsam vom HZDR-Institut für Radiopharmazeutische Krebsforschung und dem Kernphysik-Institut der Tschechischen Akademie der Wissenschaften organisiert, ging es um die Herstellung von Radionukliden – meist an Beschleunigern – für Forschung und Anwendung in der Medizin und anderen Bereichen.

## Kerne und Sterne

Ebenfalls im August fand das "15. International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS15)" statt, ausgerichtet von TU Dresden und HZDR. In 130 Vorträgen und auf 32 Postern wurden Arbeiten zu Neutroneneinfangs-Reaktionen, wie sie etwa in Sternen stattfinden, zu Kernstruktur, Kernreaktionen, Kernastrophysik und Kerndaten sowie zu Eigenschaften von quantenmechanischen Vielteilchen-Systemen präsentiert. Von den insgesamt 170 Teilnehmern kamen 15 aus China, Japan und Korea sowie 50 aus Nordamerika. Diese Relation wird sich bei der Folgekonferenz CGS16, die erstmals nach Asien wechselt, sicherlich stark verändern.

## TERMINVORSCHAU

### 15. - 17.04.2015

3rd International Workshop on Measuring Techniques for Liquid Metal Flows (MTLM2015)  
HZDR | unterstützt von der Helmholtz-Allianz LIMTECH und dem EU-Projekt ESNII+

### 08. - 10.06.2015

German Terahertz Conference  
HZDR | gemeinsam mit dem Deutschen Terahertz-Zentrum e.V.

Strahlenschutzkurse an der HZDR-Forschungsstelle Leipzig

### 24.02.2015 | 14.04.2015

Aktualisierungskurse

### 09.03. - 13.03.2015

Fachkunde (Module GH, OG)

### 24.03. - 26.03.2015

Fachkunde (Module GG, FA)

## Kunst im HZDR

### 15.01.2015

Kathrin Feist

### 05.03.2015

Philipp Gloger

### 07.05.2015

Frank Findeisen

### 13.02.2015

Lehrerfortbildung: „Energieeffiziente Materialien und Prozesse“  
HZDR | Schülerlabor DeltaX

### 19.06.2015

Ausstellung „Hi Lights!“ im Dresdner Lichtjahr 2015  
Technische Sammlungen Dresden

### 03.07.2015

Dresdner Lange Nacht der Wissenschaften

# IMPRESSUM

Foto: Oliver Killig

## HERAUSGEBER

Prof. Dr. Dr. h. c. Roland Sauerbrey und Prof. Dr. Dr. h. c. Peter Joehnk,  
Vorstand des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf (HZDR)

## ERSCHEINUNGSDATUM

Dezember 2014

ISSN: 2194-5705 // Ausgabe 02.2014

## REDAKTION

Dr. Christine Bohnet (verantwortlich), Simon Schmitt, Barbara Zalesky (Bilder) |  
Kommunikation und Medien am HZDR  
Wissenschaftlicher Redaktionsbeirat (nach Forschungsbereichen):  
Energie – Dr. Bruno Merk, Dr. Frank Stefani  
Gesundheit – Dr. Fabian Lohaus, Dr. Holger Stephan  
Materie – Dr. Stefan Facsko, Dr. Andreas Wagner

## AUTOREN DIESER AUSGABE

Dr. Uta Bilow | Freie Wissenschaftsjournalistin, Dresden  
Christian Döring | EMFL-Kommunikation, HZDR  
Sascha Karberg | Journalistenbüro Schnittstelle, Berlin  
Dr. Roland Knauer | Journalistenbüro Viering und Knauer, Lehnin  
Tina Schulz | Pressestelle Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit haben wir meist im Text nur die männliche Form der Personenbezeichnung verwendet. Mit den gewählten Formulierungen sind immer alle Geschlechter angesprochen.

## BILDNACHWEIS

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des HZDR, soweit nicht anders angegeben

## GESTALTUNG

WERKSTATT X . Michael Voigt  
[www.werkstatt-x.de](http://www.werkstatt-x.de)

## DRUCK

Druckerei Mißbach  
[www.missbach.de](http://www.missbach.de)

## AUFLAGE

4.000 // Gedruckt auf Inapa Infinity Silk, FSC zertifiziert

## KONTAKT / BESTELLUNG (kostenfrei)

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf  
Kommunikation und Medien  
Dr. Christine Bohnet  
Postfach 51 01 19 | 01314 Dresden  
Tel. 0351.260 2450  
E-Mail [c.bohnet@hzdr.de](mailto:c.bohnet@hzdr.de)

## NACHDRUCK

mit Quellenangabe gestattet. Belegexemplar erbeten.

„entdeckt“ erscheint zweimal jährlich.

Alle Print-Ausgaben finden Sie als e-paper auf den Internetseiten des HZDR.

➤ [www.hzdr.de](http://www.hzdr.de)

Das HZDR auf Facebook und Twitter:

➤ [www.facebook.com/Helmholtz.Dresden](https://www.facebook.com/Helmholtz.Dresden)

➤ [www.twitter.com/hzdr\\_dresden](https://www.twitter.com/hzdr_dresden)

# WELCOME@DRESDEN-CONCEPT

BERATUNG AUS EINER HAND  
FÜR INTERNATIONALE WISSENSCHAFTLER  
UND IHRE FAMILIEN

Relocation Service – Dual Career-Beratung – Soziale und kulturelle Integration

Dresden heißt internationale Wissenschaftler und ihre Familien herzlich willkommen. Das Dresden Welcome Center erleichtert ihnen den Start in einem fremden Land: Mitarbeiter der Landeshauptstadt Dresden helfen bei vielen behördlichen Schritten. Im gleichen Gebäude unterstützt das Team des DRESDEN-concept Welcome Service die Familien bei weiteren Fragen rund um berufliche Perspektiven und Integration.

Damit internationale Fachkräfte sich in Dresden wohlfühlen, bündeln die Landeshauptstadt Dresden, die Technische Universität und die gastgebenden Forschungseinrichtungen ihre Kompetenz in der Willkommenskultur durch DRESDEN-concept.

Wir freuen uns auf Sie!  
welcome@dresden-concept.de  
www.dresden-concept.de



Fotos © Matthias Hultsch



**DRESDEN**  
**concept**  
Exzellenz aus  
Wissenschaft  
und Kultur



**Landeshauptstadt  
Dresden**