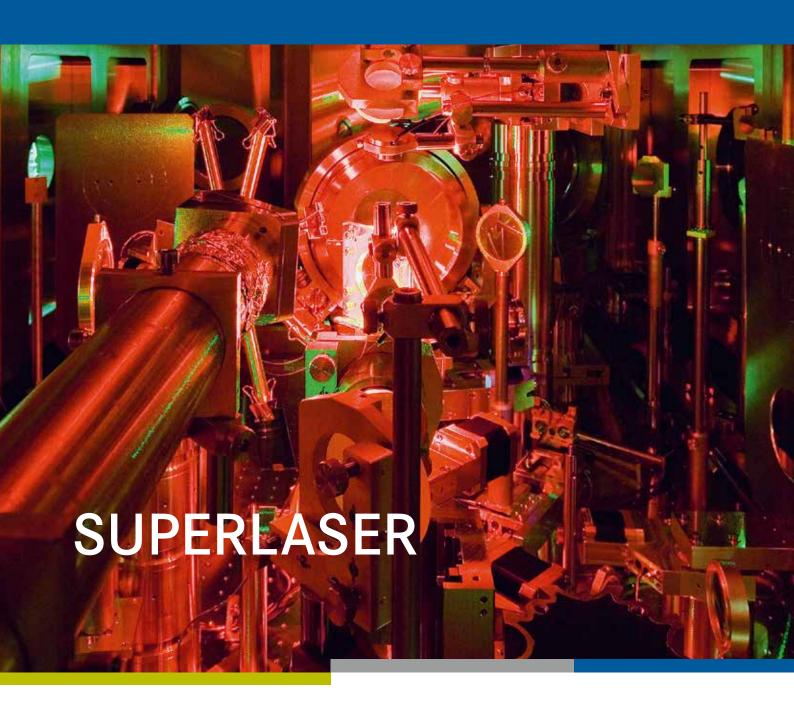
# entdeckt

DAS FORSCHUNGSMAGAZIN AUS DEM HZDR

// AUSGABE 01.2016

hzdr.de



#### **AUF DER SPUR DER PROTONEN**

Kamera für die Echtzeit-Überwachung der Protonentherapie

#### HEISSER DAMPF UND KÜHLE TROPFEN

Sieden und Verdampfen als wirkungsvolle Kühlmethoden

#### JUNGE ANLAGE IN JUNGEN HÄNDEN

Neuer Implanter für schnelle Teilchen bei hohen Strömen





TITELBILD: Experimentierkammer am Hochleistungslaser DRACO.

Foto: Jürgen Lösel



## UND LESER,

die Grundidee der Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation = LASER – stammt von Albert Einstein und ist damit fast 100 Jahre alt. Der Vorläufer des Lasers hieß Maser – das Akronym steht für Microwave amplification by stimulated emission of radiation. Realisiert hat ihn Charles H. Townes im Jahr 1954. Der Physiker aus den USA erhielt für seine "Arbeiten auf dem Gebiet der Quantenelektronik, die zur Konstruktion von Oszillatoren und Verstärkern auf der Basis des Maser-Laser-Prinzips führten", im Jahr 1964 zusammen mit Nikolaj G. Basov und Alexandr M. Prochorov den Nobelpreis für Physik. Der erste Laser war der Rubinlaser des US-amerikanischen Physikers Theodore Maiman aus dem Jahr 1960.

Dem Laser verdanken wir viele bahnbrechende Entwicklungen und faszinierende Entdeckungen. Die aktuelle Ausgabe unseres Forschungsmagazins "entdeckt" tritt allerdings nicht an, das riesige Feld der Laser-Technologie in seiner Gesamtheit aufzurollen. Vielmehr liegt uns daran, Ihnen die Laser in unserem Helmholtz-Zentrum vorzustellen. An erster Stelle steht hier, wie der Titel schon verrät, ein Superlaser.

Er heißt DRACO und hat gerade ein aufwendiges Tuning hinter sich. Gehörte dieser Kurzpuls-Laser mit einer Leistung von gut 100 Terawatt bereits zur stärksten Kategorie in Europa, so katapultiert ihn die Leistung von einem Petawatt – also einer Billiarde Watt – nun an die Weltspitze. Der Tera-Bereich schließt sich übrigens im internationalen System der Maßeinheiten direkt an den Giga-Bereich an, der dank der sich rasant entwickelnden Speichertechnologien für Computer, Smartphones & Co. allgemein bekannt ist. Ein Terawatt entspricht 10<sup>12</sup>, ein Petawatt 10<sup>15</sup> Watt.

Doch wozu wird diese Laser-Power benötigt? Leser, die das HZDR kennen, wissen das bereits: Die Kraft hochintensiver Lichtstrahlen kann genutzt werden, um Teilchen auf Trab zu bringen. In den Artikeln "Laser als Teilchen-Turbo" und "Plasmablitz im Supercomputer" erfahren Sie mehr über den aktuellen Stand der Forschung und die Einsatzmöglichkeiten dieser neuen Beschleunigertechnologie.

Laser einer besonderen Art sind auch die beiden Freie-Elektronen-Laser am ELBE-Zentrum für Hochleistungs-Strahlenquellen des HZDR. Die Elektronen sind hier das aktive Medium, während der Elektronen-Beschleuniger als Pumpmechanismus dient (die Funktionsweise eines Lasers veranschaulicht die Illustration auf Seite 9). In enger Zusammenarbeit mit der TU Dresden gelang der Aufbau eines sogenannten Nahfeldmikroskops am Freie-Elektronen-Laser. Dieses erlaubt einzigartige Einblicke in Nanowelten bei tiefsten Temperaturen.

In der Rubrik "Forschung" stellen wir Ihnen, wie immer, eine breitgefächerte Themenauswahl vor: von der ersten Patientenstudie mit einer Schlitzkamera für die hochpräzise Protonentherapie über einen Detektortyp, der im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabor die Suche nach der Dunklen Materie aufnimmt, bis hin zur Wärmeübertragung beim Sieden und Kondensieren – damit verbunden sind Fragen der Sicherheit in kerntechnischen Anlagen und der Effizienzsteigerung bei der Energieerzeugung oder bei Kühlsystemen.

Auf Ihre Kommentare und Anregungen freue ich mich und wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre

Christine Bohnet Abteilung Kommunikation und Medien im HZDR

#### INHALT

#### TITEL

Superlaser

- 04 Laser als Teilchen-Turbo
- 09 Laser-Illustration
- 10 Extremtuning für Powerlaser
- 11 Plasmablitz im Supercomputer
- 13 Grenzverschiebung in Nanowelten
- 16 Das verräterische Leuchten der Minerale
- 18 Wenn Uran auf Laserblitze anspricht

#### **FORSCHUNG**

- 21 Rohstoffaufbereitung in Europa: Gemeinsam sind sie stark
- 24 Auf der Spur der Protonen
- 26 Nur zwei oder drei Ereignisse pro Jahr
- 28 Heißer Dampf und kühle Tropfen

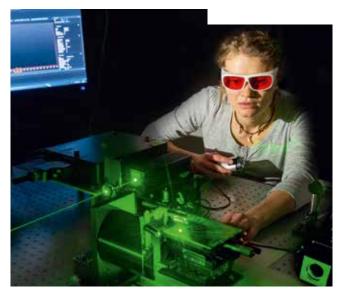
#### **PORTRÄT**

- 32 Bindeglied zwischen Simulation und Experiment
- 33 HZDR-Forschungspreis für kontrollierte Spinwellen
- 33 Neue Helmholtz-Nachwuchsgruppe
- 34 Junge Anlage in jungen Händen

#### **WISSENSWERT**

- 36 60 Jahre Radiopharmazie in Dresden
- 37 Röntgen-Plakette für Michael Baumann
- 37 EMFL wird "Wahrzeichen"
- 37 Gold für HZDR-Film
- 37 Terminvorschau
- 38 Petrus Peregrinus-Medaille 2016
- 38 Lehrerfortbildung lockt viele Teilnehmer
- 38 DeltaX begrüßt den 10.000sten Schüler







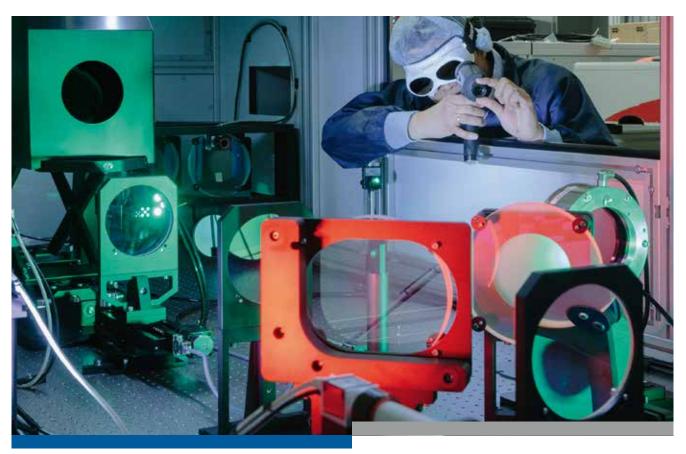








// HZDR-Physiker arbeiten an neuartigen Beschleunigungsmethoden für die Strahlentherapie.



MAXIMAL: Der Laserphysiker Arie Irman justiert die Verstärkerstrecke am DRACO-Laser mit großer Sorgfalt, um Energie und Profil des Lichtstrahls zu optimieren. Foto: Oliver Killig

#### LASER ALS TEILCHEN-TURBO

TEXT . Frank Grotelüschen

Karl Zeil hat seinen Kittel angezogen, die Schuhe gewechselt und eine Haube über den Kopf gestreift. Der Grund für die Chirurgenkluft: "Wir gehen jetzt in unser Laserlabor, und das ist ein Reinraum", erklärt der Physiker. "Wir müssen die Anlage penibel vor Staub schützen, denn Staub ist der Teufel aller Optiken!" Dann öffnet Zeil die Tür und betritt einen klassenzimmergroßen Raum vollgestellt mit länglichen Tischen, auf denen sich Blenden, Spiegel und Linsen drängen. Für das Personal bleiben nur ein paar schmale Gänge.

"Das ist der Hochleistungslaser DRACO, unser Arbeitspferd", erläutert Zeils Kollege Arie Irman. Die Abkürzung DRACO leitet sich ab von "Dresden Laser Acceleration Source". Das Gerät arbeitet in mehreren Stufen: Ein Titansaphir-Laser, kaum größer als ein Schuhkarton, erzeugt ultrakurze, relativ schwache Infrarotpulse. Sie durchlaufen mehrere Verstärkerstufen und werden zwischendrin durch Spezialoptiken geformt, gestreckt, geweitet und wieder komprimiert und gebündelt.

Am Ende besitzen die Pulse die milliardenfache Leistung, bis zu einem Petawatt, eine Billiarde Watt - allerdings nur für den extrem kurzen Zeitraum von 30 Femtosekunden, das ist deutlich weniger als eine billionstel Sekunde.

Der Superlaser dient einem einzigen Zweck: Zeil und Irman versuchen, Teilchen möglichst effizient bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit zu bringen. Beide leiten eine Nachwuchsgruppe am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. Während sich Irmans Team um die Laser-Beschleunigung von Elektronen bemüht, versuchen Zeil und seine Kollegen, Protonen und andere Ionen auf Trab zu bringen. Die Vision: eine leistungsfähige und relativ kompakte Bestrahlungsanlage für die moderne Tumortherapie mit Protonen.

Teilchenbeschleuniger spielen heute in Forschung und Anwendung eine prominente Rolle: Eine Riesenanlage wie der LHC (Large Hadron Collider) am CERN in Genf lässt Wasserstoffkerne mit Rekordenergien aufeinanderprallen, um die Welt der elementaren Materiebausteine zu erkunden. Große Elektronenbeschleuniger wie PETRA III am DESY in Hamburg erzeugen extrem intensives Röntgenlicht, mit dem sich Werkstoffe und Biomoleküle unter die Lupe nehmen lassen. Und in Kliniken benötigt man Beschleuniger für die Strahlentherapie – eine der wesentlichen Behandlungsmethoden gegen Krebs.

#### Plasmaschub statt Wellenreiten

Alle diese Anlagen basieren auf der Beschleunigung mit Radiowellen: Starke Sender speisen intensive Radiowellen in einen "Resonator" ein – ein röhrenartiges Vakuumgefäß, in dem sich die Wellen optimal ausbreiten können. Durchfliegt ein elektrisch geladenes Teilchen diesen Resonator, kann es wie ein Surfer auf der Welle reiten und zusätzlichen Schwung aufnehmen.

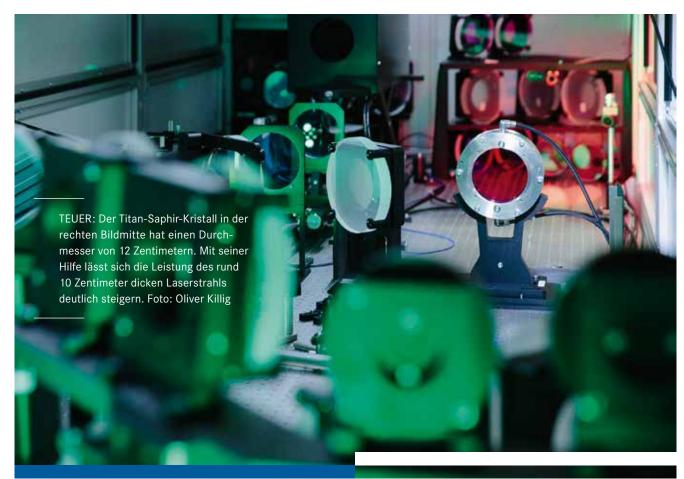
Doch das Konzept hat seine Grenzen: "Damit lassen sich die Teilchen nur bis zu einem gewissen Grad beschleunigen", erläutert Arie Irman. "Man kann immer nur eine gewisse Maximalintensität an Radiowellen in einen Resonator einspeisen, sonst bricht das Feld zusammen." Das bedeutet: Um eine angestrebte Energie zu erreichen, muss man mehrere Resonatoren hintereinanderschalten. Dadurch können die Anlagen sehr groß werden: So misst der Beschleuniger des demnächst fertiggestellten Europäischen Röntgenlasers (European XFEL) etwa 3,4 Kilometer.

Irman und Zeil tüfteln an einer Alternative, die mit deutlich weniger Platz auskommt – der Laserplasma-Beschleunigung. "Sie verspricht eine viel größere Effizienz", sagt Karl Zeil. "Bei ihr können die Beschleunigungsfelder um Größenordnungen höher sein als bei den heutigen Resonatoren." Das Prinzip: Ultrastarke Laserblitze feuern auf ein Material. Die Wucht des Lichtpulses entreißt den Atomen die Elektronen, wodurch ein Plasma entsteht – ein ionisierter Materiezustand, der überaus heiß sein kann.

Mit einem Laserpuls kann im Plasma innerhalb eines winzigen Sekundenbruchteils ein extrem starkes elektrisches Feld erzeugt werden. Dieses Feld kann Elektronen oder Ionen in Nullkommanichts nahezu auf Lichtgeschwindigkeit bringen. "Das Verfahren ist noch neu", erzählt Irman. "Erst 2004 konnten Experimente in den USA und in Europa zeigen, dass man Elektronenpakete mit einem Laserplasma auf eine Energie von einigen hundert Megaelektronenvolt (MeV) bringen kann – und zwar auf einer Strecke von wenigen Millimetern!"

#### Sprintrekord für Elektronen

Heute steht der Rekord auf 4.000 MeV bei einer Beschleunigungsstrecke von knapp sieben Zentimetern. Zum Vergleich: Ein herkömmlicher Linearbeschleuniger müsste, um dieselbe Energie zu erreichen, eine Länge von einigen hundert Metern haben. Bei den Arbeiten in Dresden geht es jedoch nicht um neue Energierekorde. Das Ziel von Irman und seinem Team ist





UPGRADE: In dieser "Targetkammer" ist der Durchmesser des Lichtstrahls bereits auf 20 Zentimeter angewachsen, seine Leistung reicht knapp an die Marke von einem Petawatt heran. Nachwuchsgruppenleiter Karl Zeil stellt gerade einen Parabolspiegel ein. Foto: Oliver Killig

eine möglichst gute Strahlqualität – und auch erste Anwendungen der laserbeschleunigten Elektronen.

In seinem Labor zeigt Irman auf eine Vakuumkammer, etwa so groß wie ein Büroraum, gefüllt mit unzähligen Komponenten aus Edelstahl. Die Pulse des DRACO-Hochleistungslasers gelangen durch ein Rohr in die Kammer und werden auf das "Target" gelenkt. "Das ist der kleine Zylinder dort, er ist nur drei Millimeter groß", beschreibt der Physiker. "Es wird von Helium durchströmt, und zwar mit Überschallgeschwindigkeit." Die gebündelten Laserpulse treffen auf die Gasatome und ionisieren sie unverzüglich zu einem Plasma. "In diesem Plasma zieht der Laserpuls ein starkes elektrisches Feld wie eine Bugwelle hinter sich her", erläutert Arie Irman. "Diese nahezu lichtschnelle Bugwelle kann Elektronen einfangen und stark beschleunigen."

Auf dieses Weise konnten die Forscher die Teilchen bereits auf eine Energie von 300 MeV beschleunigen – auf einer Strecke von nur drei Millimetern. "Jetzt wollen wir diesen Prozess besser verstehen und optimieren", sagt der Physiker. Insbesondere ist es bisher nicht leicht, einen stabilen, verlässlichen Elektronenstrahl hinzubekommen – die Grundvoraussetzung für spätere Anwendungen.

Eine der Fragen: Wie schafft man es, dass die Bugwelle des Lasers möglichst viele Elektronen mit sich reißt? Eine Möglichkeit besteht darin, zusätzlich zu den bereits im Plasma vorhandenen Elektronen weitere Teilchen zu injizieren. Dafür können die Experten den Elektronenstrahl des benachbarten ELBE-Beschleunigers nutzen. Derzeit bemühen sie sich darum, die Prozesse in der Vakuumkammer so miteinander zu synchronisieren, dass der ELBE-Elektronenstrahl tatsächlich vom Plasma weiterbeschleunigt wird.

Und was wollen die Dresdner Physiker mit den schnellen Plasma-Elektronen anfangen? "Eine naheliegende Idee ist, mithilfe der schnellen Elektronen starke Röntgenstrahlung zu erzeugen", antwortet Irman. Beispielsweise kann man die rasenden Elektronenbündel mit einem weiteren Laserstrahl zusammenprallen lassen, wodurch ausgesprochen helle und kurze Röntgenblitze entstehen. Diese Blitze wären ein überaus wertvolles Forschungswerkzeug, zum Beispiel um extreme Materiezustände unter die Lupe zu nehmen, wie sie im Inneren von Planeten und Sternen vorherrschen und wie sie sich heute zumindest kurzzeitig im Labor herstellen lassen.

#### Schnelle Teilchen mit Heilwirkung

Einer praxisnäheren Anwendung ist Karl Zeil auf der Spur: Er nutzt die hochintensiven Laserpulse von DRACO, um Protonen und andere Ionen auf Trab zu bringen – also deutlich schwerere Teilchen als Elektronen. "Schnelle Protonen und Kohlenstoff-Ionen dienen dazu, Tumorpatienten effektiv und schonend zu bestrahlen", sagt Zeil. "Würde man die Teilchen künftig mit Laserpulsen beschleunigen, könnten die Bestrahlungsanlagen kompakter, einfacher und preiswerter werden."

Vielen Medizinern gilt die Teilchentherapie als wirksamer und schonender als die konventionelle Strahlentherapie mit Röntgenlicht. Das Prinzip: Ein Beschleuniger bringt geladene Teilchen – zumeist Protonen, aber auch Kohlenstofflonen – auf Trab. Dann werden die Teilchen auf den Tumor geschossen: Sie dringen tief ins Gewebe ein und verlieren den Großteil ihrer Energie an einem bestimmten Punkt – dem

Geschwür. Damit kommt man dem Ziel einer jeden Strahlentherapie näher: maximale Dosis im Tumor, minimale Dosis im umliegenden gesunden Gewebe.

Der Haken: Der apparative Aufwand der Teilchentherapie ist enorm. Bislang braucht es einen leistungsfähigen Beschleuniger, der mithilfe von Radiowellen die Protonen auf Touren bringt. Wuchtige Magneten halten die Teilchen auf der vorgesehenen Bahn und lenken sie zum Patienten. Nicht zuletzt wegen des großen Aufwands gibt es in Deutschland bisher nur wenige Behandlungszentren, etwa das HIT in Heidelberg und die neue Universitäts Protonen Therapie Dresden (UPTD) am OncoRay-Zentrum für Krebsforschung.

Deshalb arbeiten Zeil und sein Team an einer kompakteren und hoffentlich einfacheren Methode: Statt mit Radiowellen beschleunigen sie die Teilchen mit starken Laserpulsen. Anders als bei der Laser-Elektronenbeschleunigung können lonen und Protonen allerdings nicht durch die Bugwelle des Laserblitzes angeschoben werden – dazu sind sie viel zu schwer und träge. Stattdessen greift ein indirekter Effekt: Nachdem der Laserpuls das Material in ein Plasma verwandelt hat, treibt er die Elektronen aus dem Material hinaus ins Vakuum, zurück bleiben positiv geladene Ionen.

Dadurch bildet sich ein extrem starkes elektrisches Feld aus – so stark, dass die Ionen regelrecht voneinander weggerissen und damit beschleunigt werden. "Für unsere Experimente nutzen wir kein Gas wie bei der Elektronenbeschleunigung", erläutert Karl Zeil. "Stattdessen verwenden wir Targets aus festen Materialien, zum Beispiel dünne Folien aus Metall."

Nun steuert der Physiker seinen Arbeitsplatz an – ein Labor mit direktem Zugang zum DRACO-Laser. Im Zentrum des Raums steht eine voluminöse Vakuumkammer aus Edelstahl, darin eine Vielzahl von Optiken und Komponenten. Zeil zeigt auf ein Element, das an einen übergroßen Rasierspiegel erinnert. "Er bündelt die Laserpulse auf die Folie", beschreibt der Physiker. "Die Protonen werden dann senkrecht zur Folienrückseite beschleunigt."



PROTONENTHERAPIE: An der Universitäts Protonen Therapie Dresden (UPTD) werden die geladenen Teilchen im Zyklotron (r.; blau) beschleunigt und im Strahlkanal transportiert, wo schwere Elektromagnete (gelb) sie auf ihrer Bahn halten. Ein Teil des Protonenstrahls wird in eine Experimentierhalle abgelenkt. Ein zweiter Kanal führt zur sogenannten Gantry (I.; blau), einer drehbaren Stahlkonstruktion, in deren Mitte sich der Behandlungsplatz für die Patienten befindet. Schema: OncoRay

#### Hoffnung auf den Superlaser

Um die Protonen einzufangen und zu Teilchenpulsen zu bündeln, haben die Forscher hinter der Folie einen Spezialmagneten installiert – eine Magnetspule mit kräftigen Wicklungen, durch die starke Strompulse hindurchgejagt werden. Ein Magnetfeld von bis zu 30 Tesla fängt die Protonenpulse ein und fokussiert sie in die gewünschte Richtung. Anschließend vermessen Detektoren die Pulse. Damit können die Fachleute erkennen, wie gut ihnen ein Experiment gelungen ist.

"Das Prinzip funktioniert, das konnten wir bereits zeigen", sagt Zeil. "Wir haben Protonen auf 20 MeV beschleunigt, und zwar auf einer Strecke von wenigen Mikrometern." Für die Anwendung in einer Klinik braucht es allerdings die zehnfache Teilchenenergie. Um diese zu schaffen, versuchen die Forscher, die Methode in mehrfacher Hinsicht zu verbessern. So ist unklar, welche Art von Targets sich am besten eignet. Unter anderem untersuchen die Dresdner Forscher kunststoffbeschichtete Metallfolien, aber auch tiefgekühlte "Drähte" aus gefrorenem Wasserstoff.

PENELOPE: Mit diesem neuen Laser (Petawatt - ENergy Efficient Laser for Optical Plasma Experiment) wollen die HZDR-Forscher Protonen auf Energien beschleunigen, die für die Krebstherapie relevant sind. Bis zu den ersten Experimenten werden noch mehrere Monate vergehen. Foto: Oliver Killig

Die wichtigste Strategie aber lautet: noch stärkere Laserblitze. Damit sollten sich die lonen auf deutlich höhere Energien beschleunigen lassen. Die Weichen dafür sind bereits gestellt. Karl Zeil geht zu einem Raum, der nahezu doppelt so groß ist wie das DRACO-Laserlabor. Noch ist er ziemlich leer, doch erste Komponenten sind bereits installiert. "Hier wird gerade PENELOPE aufgebaut, unser neuer Hochleistungslaser", erläutert Zeil. "Er basiert auf der hocheffizienten Diodenlasertechnik und wird bei gleicher Leistung wie DRACO deutlich längere Lichtpulse erzeugen – 150 statt 30 Femtosekunden."

Diese längeren Pulse sollten sich - so sagen zumindest Computersimulationen voraus - besonders gut für die Ionenbeschleunigung eignen. "Mit PENELOPE wollen wir therapierelevante Protonen-Energien erreichen", sagt Zeil. "In zwei bis drei Jahren hoffen wir zu wissen, ob die Methode unsere Erwartungen erfüllt und ob es sich lohnt, einen klinischen Prototyp zu bauen." Einen konkreten Plan dafür gibt es bereits: Der Prototyp soll im OncoRay-Zentrum entstehen, einer Gemeinschaftseinrichtung von HZDR, Universitätsklinikum und TU Dresden. An einem kombinierten Bestrahlungsplatz ließe sich dann die neue Technik direkt mit der alten vergleichen – Laserpulse versus Radiowellen. Und im Prinzip könnten irgendwann auch die Hochleistungslaser, die bislang noch große Räume füllen, deutlich kompakter gebaut werden. "Die Entwicklung läuft erst seit relativ kurzer Zeit", sagt Zeil. "Das Potenzial ist noch enorm."

#### **PUBLIKATIONEN:**

K. Zeil u.a.: "Direct observation of prompt pre-thermal laser ion sheath acceleration", in Nature Communications 2012 (DOI: 10.1038/ncomms1883)

K. Zeil u.a.: "Dose-controlled irradiation of cancer cells with

laser-accelerated proton pulses", in Applied Physics B – Lasers and Optics 2012 (DOI 10.1007/s00340-012-5275-3)

A. Jochmann, A. Irman u.a.: "High resolution energy-angle correlation measurement of hard X-rays from laser-Thomson backscattering", in Physical Review Letters 2013 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.114803)



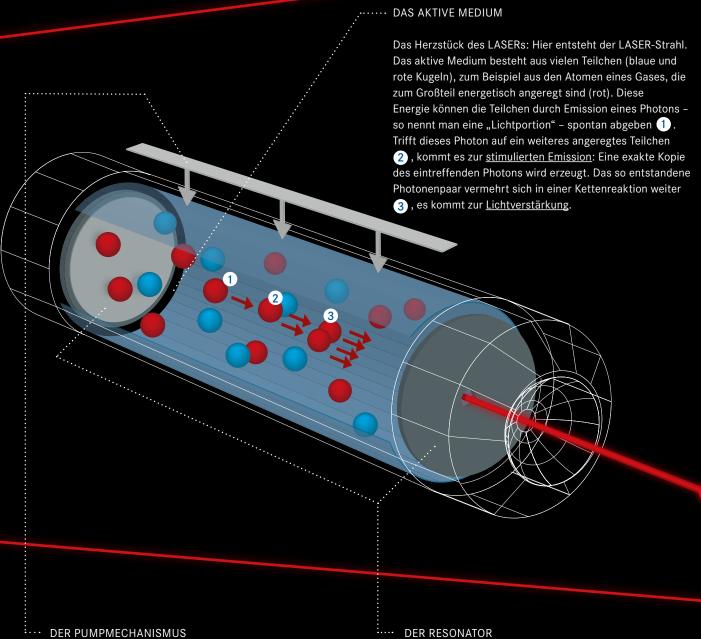
#### \_ KONTAKT

\_Nachwuchsgruppe Laser-Elektronenbeschleunigung am HZDR **Dr. Arie Irman** a.irman@hzdr.de

\_Nachwuchsgruppe Laser-Ionenbeschleunigung am HZDR Dr. Karl Zeil k.zeil@hzdr.de

### L-A-S-E-R Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

#### Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung



Die Teilchen im aktiven Medium müssen mit Energie aufgeladen werden. Dies kann durch eine elektrische Entladung geschehen. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, so stark zu "pumpen", dass sich mehr Teilchen im aufgeladenen (rot) als im nicht aufgeladenen (blau) Zustand befinden. Man bezeichnet das als Besetzungsinversion.

Zwei parallele Spiegel sorgen dafür, dass die LASER-Strahlung im aktiven Medium gefangen bleibt. Während das Licht hin und her läuft, verstärkt es sich selbst durch stimulierte Emission immer weiter - man spricht von positiver Rückkopplung. Dabei ist einer der beiden Spiegel teildurchlässig: Hier tritt der Strahl aus dem LASER.

// Eine grundlegende Umrüstung sorgt beim Laser "DRACO" für noch stärkere Pulse.

## **EXTREMTUNING FÜR POWERLASER**

TEXT . Frank Grotelüschen

Um Teilchen effektiv per Laserplasma-Beschleunigung auf Trab zu bringen, braucht es vor allem eines – Laser mit ausgesprochen hoher Leistung. Am HZDR übernimmt DRACO diese Aufgabe, das Kürzel steht für "Dresden Laser Acceleration Source". Die Anlage liefert ultrakurze Pulse mit einer Leistung von 100 Terawatt (TW). Nun wurde der Laser grundlegend erweitert und durch neue Komponenten ergänzt. Die Folge dieses Upgrades: DRACO kann nun auch Pulse von zehnfacher Leistung erzeugen, also einem Petawatt.

DRACO besteht aus mehreren Kernkomponenten: Ausgangspunkt ist ein kompakter Titansaphir-Laseroszillator, der pro Sekunde 78 Millionen ultrakurze Laserpulse erzeugt. Jeder dieser Pulse ist nur etwa 30 Femtosekunden lang und besitzt eine Energie von wenigen Nanojoule. Für die Experimente muss diese Energie um das Milliardenfache erhöht werden. Das erledigen optische Verstärker. Im Prinzip sind das weitere Laserstufen, die die Zahl der Lichtteilchen vervielfachen und dadurch die Energie der Laserpulse steigern.

Die Herausforderung: Bei einem Hochleistungslaser drohen die verstärkten Lichtpulse derart stark zu werden, dass sie die optischen Elemente beschädigen. Deshalb greifen die Experten zu raffinierten Tricks: Sie weiten die Pulse räumlich auf und vergrößern ihren Querschnitt von wenigen Millimetern bis auf 30 Zentimeter. Dadurch verteilt sich die Energie auf eine größere Fläche und ist weniger konzentriert. Erst am Ende, kurz vor dem Experiment, wird der Strahl wieder gebündelt.

Allerdings genügt die räumliche Aufweitung alleine noch nicht. Zusätzlich muss man die Pulse auch zeitlich strecken. Dafür wird der Strahl durch eine Anordnung von optischen Gittern gelenkt. Dieser "Strecker" dehnt die Blitze von ursprünglich 30 Femtosekunden auf eine Nanosekunde, also das 30.000-Fache. Damit verteilt sich die Energie auf einen größeren Zeitraum, ihre Konzentration nimmt ab. Am Ende müssen die Pulse dann wieder auf ihre ursprüngliche Länge von 30 Femtosekunden "gestaucht" werden. Das geschieht in großen Kompressortanks – erneut mithilfe optischer Gitter.

Ursprünglich bestand DRACO aus einem "Front-End"-Bereich, der die Pulse erzeugt und bis auf eine Energie von einem Joule verstärkt. Nachgeschaltet war ein Power-Verstärker, der die Energie der Blitze auf etwa sechs Joule anhob. Mit dem Upgrade ist dieser Aufbau nun um einen weiteren Zweig ergänzt worden: Jetzt wird der Strahl, der den Front-End-Bereich verlässt, per Strahlteiler gesplittet. Den ersten Zweig bildet die Endstufe des alten 100-TW-Lasers. Der zweite, neue Zweig besteht aus einem großen optischen Verstärker sowie einem voluminösen Kompressortank. Da der Strahl auf 30

statt auf 10 Zentimeter aufgeweitet werden muss, ist dieser Tank deutlich größer als der des 100-TW-Zweigs. Dieser neue Zweig verstärkt die Pulse auf eine Energie von rund 40 Joule – was bei einer Pulslänge von 30 Femtosekunden einer Leistung im Petawatt-Bereich entspricht.

Eine der Herausforderungen beim DRACO-Upgrade bestand in der Fertigung der optischen Elemente. Insbesondere die Herstellung der zwölf Zentimeter großen Titansaphir-Scheiben für die Laserverstärker erwies sich als höchst anspruchsvoll. Der Grund: Um eine gleichmäßige Verstärkung zu ermöglichen, müssen diese Kristalle eine extrem hohe Qualität zeigen. Erst seit wenigen Jahren schafft es die Industrie, sie in der gewünschten Art und Größe zu züchten. Es gibt bislang nur wenige davon auf der Welt – ein paar stehen in Dresden.

Außerdem musste für den neuen Petawatt-Zweig der Front-End-Bereich umgerüstet werden. Der Grund: Jedem der ultrastarken Pulse eilt eine Art Vorhut voraus. Würde man die Energie der Pulse einfach so bis in den Petawatt-Bereich verstärken, würde diese Vorhut derart intensiv, dass sie die Probe vorzeitig zerstört. Eine zusätzliche Filterstufe sorgt für eine bessere Reinigung des Laserstrahls, wodurch die den Pulsen vorauseilende Vorhut klein gehalten werden kann.

Schließlich wollten die Experten nach dem Umbau gewährleisten, dass beide Zweige gleichzeitig betrieben werden können. Dabei machen sie sich zunutze, dass sowohl die Petawatt- als auch die 100-TW-Pulse aus derselben Quelle gespeist werden. Durch den geschickten Einsatz von Verzögerungsstrecken gelingt es, die Pulse aus beiden Zweigen im Experiment aufeinandertreffen zu lassen. Damit sind zum Beispiel Pump-Probe-Experimente möglich: Hierbei wechselwirkt der Puls aus dem einen Laserzweig mit einer Materieprobe, die gleich darauf der Blitz aus dem anderen Zweig beleuchtet und analysiert.

Das Upgrade ist ein gemeinsames Entwicklungsprojekt des HZDR und der französischen Firma Amplitude Technologies. Die Arbeiten begannen 2011 mit der Erweiterung des Laborgebäudes. Anfang 2016 war die Anlage komplett, danach folgten erste Tests. Der nächste Meilenstein ist für den August geplant: Dann sollen beim DRACO-Upgrade die wissenschaftlichen Experimente starten.

#### KONTAKT

\_Institut für Strahlenphysik am HZDR Prof. Ulrich Schramm u.schramm@hzdr.de // Wie HZDR-Theoretiker Thomas Kluge die Laserbeschleunigung im Rechner simuliert.

#### PLASMABLITZ IM SUPERCOMPUTER

TEXT . Frank Grotelüschen



VERSTÄNDNIS: Der Physiker Thomas Kluge nutzt Superrechner, um die Beschleunigung von Teilchen mit Hochleistungslasern zu simulieren. Foto: Oliver Killig

"Stellen sie sich vor, man würde die gesamte auf die Erde treffende Sonnenstrahlung auf eine Bleistiftspitze bündeln", beschreibt Thomas Kluge. "Soviel Leistung steckt in jedem unserer Laserpulse – allerdings nur für 30 Femtosekunden, also für 30 billiardstel Sekunden." Was passiert, wenn diese ultraintensiven Lichtblitze auf einen Festkörper treffen, etwa auf eine dünne Metallfolie? "Diesen Vorgang im Computer zu simulieren, ist kniffelig", antwortet der Theoretiker. "Denn bei den Prozessen passieren mehrere extreme Dinge gleichzeitig."

Konkret heißt das: Trifft ein Blitz auf die Folie, erzeugt er derart hohe elektromagnetische Felder, dass er die Atome, aus denen sie besteht, unverzüglich

ionisiert: Innerhalb von Femtosekunden werden Elektronen aus der Atomhülle gefegt, zurück bleiben positiv geladene lonen. Es entsteht ein starkes elektrisches Feld, das einige der Ionen mit enormer Wucht herauskatapultiert – ein hocheffektiver Beschleunigungsprozess.

Das Problem dabei: Bei diesen Prozessen treten Instabilitäten auf. Zum Beispiel verlassen die Elektronen die Folie meist nicht als ein homogener Strahl, sondern in vielen kleinen Strahlen. Das wiederum beeinflusst das beschleunigende Feld, das die Ionen in der Folie "sehen": Statt gleichmäßig ist es mehr oder weniger stark deformiert.

Die Laserbeschleunigung von Teilchen ist ein hochkomplexer Vorgang: Ein ultrakurzer Lichtblitz trifft auf Materie und erzeugt ein Plasma, das Elektronen in Sekundenbruchteilen fast auf Lichtgeschwindigkeit katapultiert und Ionen beschleunigt. Um diesen Prozess für Anwendungen wie die Tumortherapie nutzbar zu machen, wollen ihn die Experimentalphysiker möglichst effektiv gestalten. Schützenhilfe erhalten sie von den Theoretikern: Mithilfe der weltweit besten Superrechner simuliert HZDR-Physiker Thomas Kluge die Laserbeschleunigung im Rechner und gewinnt dadurch tiefe Einblicke in das physikalische Geschehen. Seine Ergebnisse helfen, die Experimente besser zu verstehen und für künftige Messungen zu optimieren.

#### Unregelmäßigkeiten zunutze gemacht

Diese Instabilitäten versuchen Kluge und seine Kollegen bei den Simulationen möglichst detailliert zu erfassen. "Es geht uns darum, die Instabilitäten zu minimieren", beschreibt der Physiker. "In manchen Fällen aber wollen wir sie sogar ausnutzen." So haben die Forscher herausgefunden, dass es vorteilhaft sein kann, gezielt mikrometerkleine Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche der Folie aufzubringen. Das verleiht dem Laserpuls eine größere Angriffsfläche, das Material absorbiert mehr Laserenergie. Die Folge: Die Teilchenbeschleunigung verläuft um bis zu 50 Prozent effektiver.

Allerdings sind die Simulationen aufwendig und laufen nicht auf dem Büro-PC, sondern nur auf Supercomputern. Unter anderem nutzen Kluge und seine Kollegen den HZDR-Großrechner "Hypnos", haben aber auch schon mit einer der schnellsten Maschinen der Welt gearbeitet, dem Supercomputer "Titan" in den USA. Teilweise laufen die Simulationen über mehrere Wochen – und zwar auf Tausenden von Prozessoren gleichzeitig.

Die Resultate sind übrigens auch für Astrophysiker von Belang: Denn im Inneren von Planeten und Sternen können ähnliche Bedingungen herrschen wie beim Wechselspiel von Laserpuls und Folie. "Auch dort kann es zu vergleichbaren Instabilitäten kommen", erläutert Thomas Kluge. "Die Ergebnisse unserer Rechnersimulationen können helfen, genauere Modelle zur Evolution von Planeten und Sternen zu entwickeln."

Fest steht: Bislang bilden Computersimulationen die einzige Möglichkeit, einen direkten Blick ins Plasma und auf das Wechselspiel zwischen Laserblitz und Materie zu werfen. Dagegen sind die bisherigen experimentellen Methoden allenfalls in der Lage, indirekte Indizien zu liefern: So können Detektoren jene Röntgenstrahlung messen, die beim Einschlag der Laserblitze in die Folien als Nebenprodukt entsteht. Allerdings lassen sich die Signale bestenfalls bis auf einige Mikrometer genau auflösen. Wünschenswert wäre eine Auflösung im Nanometerbereich – auf dieser Skala passieren die entscheidenden Prozesse.

Fortschritte könnte ein neues Verfahren liefern, an dem Kluge und seine Kollegen derzeit arbeiten: "Wir wollen mit den extrem starken und kurzen Röntgenblitzen arbeiten, die der Europäische Röntgenlaser ab 2017 zur Verfügungen stellen soll." Der European XFEL entsteht derzeit in Hamburg – eine 3,4 Kilometer lange Beschleunigeranlage, die die stärksten Röntgenpulse der Welt liefern wird.

#### Tiefer Blick ins Plasma

An diesem Giganten planen die HZDR-Forscher ein spektakuläres Experiment: Ein gewöhnlicher Laser feuert kurze Lichtblitze auf eine Probe, etwa eine Folie. Auf einem mikrometergroßen Fleck bildet sich ein Plasma, das Teilchen hocheffizient beschleunigen kann. Unmittelbar nachdem der Laserpuls auf die Folie getroffen ist, kommt ein zweiter Puls – der Röntgenblitz aus dem European XFEL. Er durchleuch-

tet das Geschehen – ähnlich wie der Arzt im Krankenhaus seine Patienten durchleuchtet. "Indem wir die Zeit zwischen Laserpuls und Röntgenblitz variieren, können wir den Prozess regelrecht abrastern", erklärt Kluge. "Dann wollen wir die Aufnahmen zu einem Film kombinieren und beobachten, was da eigentlich passiert." Die Methode soll das Geschehen bis auf wenige Nanometer auflösen – fein genug, um die wichtigen Instabilitäten im Plasma zu erkennen.

Als Theoretiker hat Kluge das Experiment im Computer bereits simuliert. Die entscheidende Frage aber konnte nur ein Experiment beantworten: Wenn man in das heiße Plasma mit einem Röntgenblitz hineinschießt – kommen überhaupt genügend viele von der Probe gestreute Röntgensignale heraus?

Testen konnten die Forscher das Verfahren im Rahmen einer größeren Messkampagne am derzeit stärksten Röntgenlaser der Welt, dem LCLS (Linac Coherent Light Source) in Kalifornien. Das Resultat: "Wir haben tatsächlich ein Streubild gesehen, das unseren Erwartungen entspricht", freut sich Kluge. "Damit ist die Machbarkeit des Verfahrens demonstriert." Darüber hinaus konnten die Physiker sogar schon erste physikalische Erkenntnisse sammeln: "Unter bestimmten Bedingungen entstehen Schockwellen, die sich durch die Folie ausbreiten", so Kluge. "Dadurch kommt es zum Beispiel zu Frakturen oder Phasenübergängen im Material." Es zeigte sich, dass diese unterschiedlichen Bereiche äußerst scharf voneinander abgegrenzt sind – ein wichtiges Detail für das Verständnis der Plasmaprozesse.

Der Plan jedenfalls steht: Ab 2018 wollen die Forscher regelmäßig zum XFEL nach Hamburg pilgern, um dort an der HIBEF-Station (Helmholtz International Beamline for Extreme Fields) zu experimentieren, der von HZDR und DESY im Rahmen einer internationalen Kollaboration betrieben wird. "Obwohl ich Theoretiker bin, werde ich sicher gelegentlich dabei sein, auch wenn das die eine oder andere Nachtschicht bedeutet", erzählt Kluge. "Denn das ist die erste Methode, die einen direkten Blick ins Plasma erlaubt. Und das verspricht uns Theoretikern einen Schub, um unsere Vorhersagen deutlich zu verbessern."

#### PUBLIKATION:

T. Kluge u.a.: "Nanoscale femtosecond imaging of transient hot solid density plasmas with elemental and charge state sensitivity using resonant coherent diffraction", in Physics of Plasmas 2016 (eingereicht), online http://arxiv.org/abs/1508.03988.

#### \_ KONTAKT

\_Institut für Strahlenphysik am HZDR **Dr. Thomas Kluge** t.kluge@hzdr.de // Physiker der TU Dresden und des HZDR umgehen Grenzen der Optik mit der Nahfeld-Mikroskopie und zeigen, wie der fließende Übergang von Hochschulforschung zur außeruniversitären Wissenschaft funktionieren kann.



REKORDVERDÄCHTIG: Denny Lang, Doktorand am HZDR, bei der Justage des Tieftemperatur-Nahfeldmikroskops am Freie-Elektronen-Laser FELBE. Foto: Oliver Killig

## **GRENZVERSCHIEBUNG IN NANOWELTEN**

\_TEXT . Christian Döring

Ein Blick in ein Mikroskop ist immer auch ein Eintauchen in Welten, die sonst vor uns verborgen bleiben. Winzige Materialfasern, kleinste Bakterien und einzelne Staubkörner türmen sich plötzlich wie Wolkenkratzer oder gar planetenähnliche Gebilde auf. In der modernen Forschung wird längst in Nanometer-Bereichen – also millionstel Millimetern – gemessen. Klassische Mikroskope gelangen dort allerdings schnell an ihre absolute Grenze – das sogenannte Abbe-Limit. Ab dieser Grenze führt die Beugung des Lichts dazu, dass man einzelne Punkte nicht mehr voneinander unterscheiden kann.

Die höchstmögliche Auflösung liegt bei einem herkömmlichen optischen Mikroskop ungefähr bei der Hälfte der Wellenlänge des verwendeten Lichts. Selbst mit besonders kurzwelligem ultra-violetten Licht lassen sich demnach kaum noch Details untersuchen, die kleiner sind als 200 Nanometer. Zum Ver-

gleich: Die Strukturen auf modernen Mikrochips sind bereits deutlich kleiner, und auch viele Viren messen kaum mehr als 100 Nanometer.

#### Nanospitze wird mit Infrarotstrahlung beschossen

Will man Nanowelten mit langwelliger Infrarotstrahlung erforschen, bedeutet das eine ernstzunehmende Hürde, wie der Physiker Stephan Winnerl vom HZDR-Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung erläutert: "Diese elektromagnetische Strahlung eignet sich einerseits sehr gut für viele physikalische Untersuchungen, da sie Materie leicht durchdringt und zugleich Schwingungen in Molekülen oder Festkörpern anregen kann. Andererseits wird die Auflösung mit zunehmender Wellenlänge immer schlechter." Eine Zwickmühle, aus der

 $\rightarrow$ 

12

13

sich die Forscher mit einem Trick befreien: Mit einer besonders kleinen Sonde rücken sie bis auf wenige Nanometer an die Probe heran – in das Nahfeld.

Bei der sogenannten Nahfeld-Mikroskopie wird nur ein winziger Punkt direkt unter der Spitze der Sonde betrachtet. Um zusammenhängende Strukturen zu untersuchen, muss deshalb die gesamte Oberfläche der Probe in einem vordefinierten Raster abgesucht werden. Die Freie-Elektronen-Laser am ELBE-Zentrum für Hochleistungs-Strahlenquellen des HZDR liefern dafür die punktgenaue Beleuchtung, wie Winnerl erklärt: "Wir erzeugen einen in der Wellenlänge justierbaren, intensiven Infrarotstrahl, der direkt auf die Spitze gelenkt wird." Das von dort zurückgestreute Licht wird mit einem Detektor gemessen. Es enthält optische Informationen aus dem Bereich der Probe direkt unterhalb der Spitze. Dies ist nicht durch die Wellenlänge begrenzt.

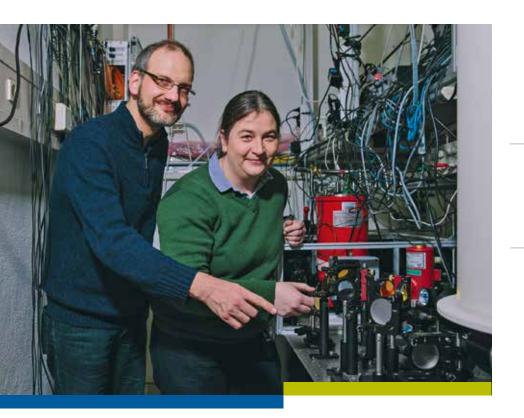
#### Eigenes Gast-Labor an der ELBE

Damit aus den vielen Informationen der einzelnen Punkte am Ende ein Bild der Probe entstehen kann, setzt ein Computer sie wie ein Mosaik zusammen. Ein Prinzip, das bei der Rasterkraft-Mikroskopie schon länger etabliert ist: Auch dort wird eine wenige Nanometer kleine Nadel zeilenweise in einem feinen Raster über die Probe geführt. Allerdings werden dabei nur die atomaren Kräfte zwischen Nadelspitze und Probenoberfläche ausgewertet – die Spitze tastet noch blind. "Erst durch die Messung der Rückstrahlung in der Nahfeld-Mikroskopie lassen sich zusätzlich auch optische Eigenschaften der Probe nach dem gleichen Rasterprinzip untersuchen", erläutert Susanne Kehr, Physikerin am Institut für Angewandte Physik (IAP) an der TU Dresden.

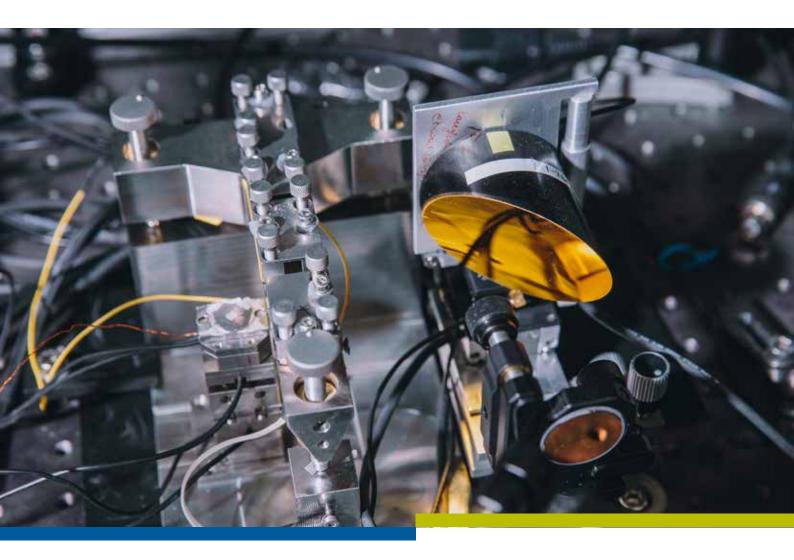
Kehr leitet dort am Lehrstuhl von Lukas Eng eine junge Forschergruppe, die sich intensiv mit mikroskopischer Methodik beschäftigt und Dauergast am ELBE-Zentrum ist. "In den Anfangsjahren haben wir noch regelmäßig einen Kleinwagen an der Uni mit Geräten vollgepackt und sind nach Rossendorf gefahren. Das war ein wenig wie Tetris spielen mit empfindlicher Mikroskopie-Technik", sagt Kehr lächelnd. Heute steht der Gruppe ein eigenes Optik-Labor an der ELBE zur Verfügung, an dem die Forscher zwei Nahfeld-Mikroskope fest installiert haben.

Die Freie-Elektronen-Laser können im sogenannten Dauerstrich-Modus betrieben werden: "Dabei liefern die Laser Strahlungspulse mit hoher Wiederholrate und kontrollierbarer Intensität. Das ist wichtig, da wir auf ein kontinuierliches Signal angewiesen sind und einzelne starke Pulse viele Proben zu stark anregen oder gar zerstören könnten."

Die sehr gute Zusammenarbeit zwischen der IAP-Gruppe und den Wissenschaftlern am HZDR führte bereits zu beachtlichen Ergebnissen. So entwickelte der ehemalige HZDR-Doktorand Markus Fehrenbacher im Rahmen dieser Kooperation eine Superlinse auf Halbleiter-Basis, die ihrerseits eine Abbildung unterhalb des Beugungslimits ermöglicht und optische Signale in der Probe verstärkt. "Um solche Linsen überhaupt genauer zu untersuchen, braucht man eine Mikroskopie-Technik, die selbst nicht von der Wellenlänge beschränkt wird", so Winnerl. Mit der Nahfeld-Mikroskopie konnten die Forscher erstmals zeigen, wie der Halbleiter Galliumarsenid durch zusätzliche Elektronen von gezielt eingebrachten Fremdatomen zur Superlinse verändert werden kann. Über die Konzentration solcher Störstellen lässt sich die Linse sogar auf die gewünschte Wellenlänge abstimmen.



KOLLEGEN: Stephan Winnerl vom HZDR und Susanne C. Kehr von der TU Dresden arbeiten seit Jahren erfolgreich zusammen. Foto: Oliver Killig



EMPFINDLICH: Basis des Nahfeldmikroskops "T-Bone" ist ein im Eigenbau erstelltes Rasterkraftmikroskop (links). Es wird durch den Parabolspiegel rechts beleuchtet. Foto: Oliver Killig

## Ambitionierte Suche nach Störstellen bei tiefsten Temperaturen

Wie fließend die Übergänge zwischen den beiden Forschergruppen sind, zeigt sich auch am Beispiel von Denny Lang. Während seiner Diplomarbeit an der TU Dresden wurde der 27-Jährige von Susanne Kehr betreut, heute promoviert er am HZDR: "Ich untersuche mit dem Nahfeld-Mikroskop das Spektrum einzelner Störstellen in Silizium. Gelingt die Zuordnung zu den jeweiligen Wellenlängen, könnten die Störstellen möglicherweise zum Bau von Quantencomputern genutzt werden." Ein besonders ambitioniertes Projekt, denn nur bei sehr tiefen Temperaturen von unter -250 Grad Celsius ist eine solche Untersuchung überhaupt möglich. Die Gruppe ist damit weltweit die erste, die Nahfeld-Mikroskopie bei derart niedrigen Temperaturen an einem Freie-Elektronen-Laser durchführt. Denny Lang: "Nur nahe dem absoluten Nullpunkt können wir eine thermische Anregung des Materials ausschließen, die unsere Messungen verfälschen würde."

Um die Möglichkeiten der Nahfeld-Mikroskopie in Zukunft noch zu erweitern, wollen die Forscher von der TU Dresden über den Infrarot-Bereich hinausgehen. Das Ziel ist die Nutzung von noch längeren Wellen im Terahertz-Bereich, die ab dem zweiten Halbjahr 2016 an "TELBE", der neuen Terahertz-Anlage am ELBE-Zentrum, zur Verfügung stehen. Diese langwellige und niederfrequente Strahlung könnte viele Materialien während der Mikroskopie magnetisch anregen – ein weiteres Hilfsmittel, um die Nanowelten noch genauer zu erkunden.

#### **PUBLIKATIONEN:**

S. Kehr u.a.: "A local superlens", in ACS Photonics 2016 (DOI: 10.1021/acsphotonics.5b00365)

M. Fehrenbacher u.a.: "Plasmonic superlensing in doped GaAs", in Nano Letters 2015 (DOI: 10.1021/nl503996q) \_\_\_

#### \_ KONTAKT

\_Institut für Angewandte Physik an der TU Dresden **Dr. Susanne Kehr** susanne.kehr@iapp.de

\_Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung am HZDR **Dr. Stephan Winnerl** s.winnerl@hzdr.de

 $\ensuremath{\nearrow}$  https://tu-dresden.de/die\_tu\_dresden/fakultaeten/fakultaet\_mathematik\_und\_naturwissenschaften/fachrichtung\_physik/iap/

// Laser halten als Forschungswerkzeuge auch in der Rohstofferkundung Einzug. Geografin Margret Fuchs will mit ihnen Metalle schnell und berührungslos erkennen, aber auch effizient gewinnen. Unterstützung bekommt sie dafür von der TU Bergakademie Freiberg.

## DAS VERRÄTERISCHE LEUCHTEN DER MINERALE

TEXT . Tina Schulz

Wenn Margret Fuchs die schwere Metalltür zu ihrem Arbeitsplatz hinter sich schließt, verabschiedet sie sich jedes Mal für Stunden von der Außenwelt: Die junge HZDR-Wissenschaftlerin mit dem hellbraunen Lockenkopf experimentiert in beinahe völliger Dunkelheit. Über einen fensterlosen Vorraum betritt sie vorsichtig das abgedunkelte Labor. Nachdem sich ihre Augen an die Umgebung gewöhnt haben, umrundet sie geschickt die Umrisse eines Versuchsaufbaus. Mit dem Kegel ihrer Taschenlampe tastet sie über einen UV-Laser, betätigt dann den Schalter und schickt damit unzählige Photonen durch einen Laserparcours. Augenblicklich erscheint an dessen Ende ein sandkorngroßer Punkt: ein Miniaturkristall, den der UV-Laser zum Leuchten anregt.



Dass gewisse Materialien die Eigenschaft besitzen, kurzlebiges Licht zu emittieren, sobald sie einer bestimmten Lichtquelle ausgesetzt sind, kennen viele im Alltag aus Einkaufszentren. Dort schieben Kassierer Geldscheine unter UV-Lampen, um echte Banknoten von Fälschungen zu unterscheiden. Das gelingt, weil den echten Geldscheinen schon bei der Herstellung fluoreszierende Fäden beigemischt werden, die unter Schwarzlicht bunt aufleuchten. Margret Fuchs, die seit 2015 am zum HZDR gehörenden Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) arbeitet, will das physikalische Phänomen nutzen, um Seltene Erden aufzuspüren. Dabei handelt es sich um eine Gruppe von 17 Metallen, wie zum Beispiel Cerium, Neodym oder Lanthan, die die moderne Hightech-Industrie für den Bau von Bildschirmen oder extrem starken Magneten benötigt. Anders als der Name suggeriert, sind Seltene Erden in der Erdkruste recht häufig anzutreffen. Doch im Gegensatz zu anderen Erzen liegen sie dort meist fein verteilt und selten hochkonzentriert vor, weshalb sich Erkundung und Abbau der Hightech-Metalle oft so schwierig gestalten.

Zerstörungsfrei erkunden

Grundlage für das neue Erkundungsverfahren ist die laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie (LIF). Dabei regt Margret Fuchs Minerale mit Lasern unterschiedlicher Wellenlänge an: vom ultravioletten bis hin zum infraroten Bereich. Von Natur

aus fluoreszieren aber nicht alle Minerale. Für die Leuchterscheinung sorgen meist Verunreinigungen im Kristallgitter durch Fremdatome - etwa die von Seltenen Erden. Deswegen eignet sich die Fluoreszenz-Methode auch besonders gut für den Nachweis solcher Metalle. In dem Moment, in dem der Laser ein Fremdatom anregt, springen die darin enthaltenen Elektronen vom energetischen Grundzustand immer wieder auf ein höheres Energieniveau und zurück. Dabei wird Licht mit einem charakteristischen Emissionsspektrum freigesetzt, das von einer speziellen Kamera gemessen wird. "Das Spektrum ist ähnlich einzigartig wie der Fingerabdruck eines Menschen", erklärt Margret Fuchs. Zukünftig soll ein Scanner entwickelt werden, der diesen Fingerabdruck an Gesteinsoberflächen von Bohrkernen oder Lagerstätten sichtbar machen soll. Anders als gängige Erkundungsmethoden, die gewöhnlich auf umfassende chemische und physikalische Analysen angewiesen sind, sollen natürliche Seltenerd-Vorkommen so zerstörungsfrei und damit auch schneller aufgespürt werden.

Die LIF-Forschung ist Teil einer ganzen Reihe "sanfter" Erkundungsmethoden, an deren Entwicklung und Einsatz das Freiberger Institut derzeit beteiligt ist. So gibt zum Beispiel eine Flugsonde, die unterhalb eines Hubschraubers angebracht ist, Sendesignale in bestimmten Messfrequenzen an den Untergrund ab. Dort rufen die Signale elektrische Felder hervor, die die Sonde anschließend wieder empfängt. Daraus bestimmen ightarrow die Forscher die elektrische Leitfähigkeit, die Anzeichen für im Gestein vorhandene Erzminerale liefern kann. Außerdem testen die Geowissenschaftler, wie man Drohnen mit verschiedenen Erkundungsmethoden der Luftbildvermessung oder Spektroskopie kombinieren kann, um hochaufgelöste Modelle der Erdoberfläche zu generieren.

#### Gewinnungsprozesse in Echtzeit optimieren

Das Laser-Verfahren könnte allerdings nicht nur für die direkte Erkundung von Seltenen Erden nützlich sein, auch Gewinnungs- und Aufbereitungsprozesse könnten von dieser Technologie profitieren. Um die Förderung und Verarbeitung der Erze konstant an deren Zusammensetzung anzupassen, wird das abgebaute Material ständig untersucht. In regelmäßigen Abständen werden dafür Proben genommen und meist in aufwendigen und langwierigen Labortests analysiert. Scanner, die Veränderungen der Zusammensetzung fortwährend, automatisch und quasi in Echtzeit messen, wären weitaus energie- und kosteneffizienter.

"Damit das Verfahren richtig funktioniert, müssen wir aber noch viele Hürden nehmen, wie zum Beispiel die Übertragung der Laborergebnisse auf natürliche Bedingungen", gibt Margret Fuchs zu bedenken. Vor kurzem erst hat die Geografin die Emissionsspektren von gezüchteten und natürlichen Mineralen miteinander verglichen. Im Gegensatz zu den gezüchteten Proben kann sich im Kristallgitter natürlicher Minerale ein ganzes Sammelsurium an Fremdatomen einlagern. Die Fingerabdrücke zweier gleicher Minerale unterscheiden sich somit erheblich voneinander. Außerdem sind reine Minerale

ANREGUNG: In der leuchtenden Probe ist Europium – ein Element der Seltenen Erden – im Kristallgitter eines künstlichen Minerals enthalten. Foto: Detlev Müller

in der Natur eher selten. Vielmehr kommen sie in natürlichen Gesteinen und Erzen als komplexe Mischungen vor, sodass sich immer mehrere Spektren überlagern. "Damit wir solche Mischspektren besser voneinander unterscheiden können, müssen wir die Fluoreszenz-Eigenschaften einzelner Minerale untersuchen", ergänzt die Forscherin.

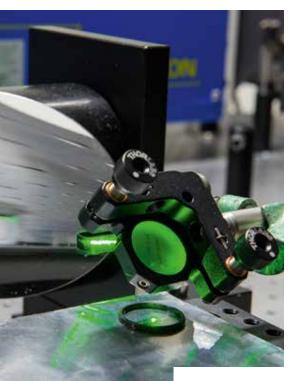
Für ihre Analysen nutzt Margret Fuchs das Labor für optische Charakterisierung am Institut für Angewandte Physik der TU Bergakademie Freiberg, dem wichtigsten Kooperationspartner des Helmholtz-Instituts. Gemeinsam mit den Wissenschaftlern der Universität untersucht sie die Spektren der Minerale. Mit den daraus gewonnenen Daten will sie Algorithmen erstellen, die die gemessenen Emissionssignale automatisch auswerten und aus Punktmessungen ganze Karten erzeugen. Für das Entwicklerteam hat sich das Helmholtz-Institut auch die Freiberg Instruments GmbH ins Boot geholt. Das Unternehmen baut Spezialmesstechnik für den internationalen Markt. Seine Aufgabe wird es sein, den LIF-basierten Scanner zu entwickeln und schließlich zu bauen. Im Moment steckt das Verfahren allerdings noch in den Kinderschuhen. Bis es für die Praxis gewappnet ist, wird Margret Fuchs noch viele Labortage damit verbringen, den Mineralen ihr leuchtendes Geheimnis zu entlocken. \_\_

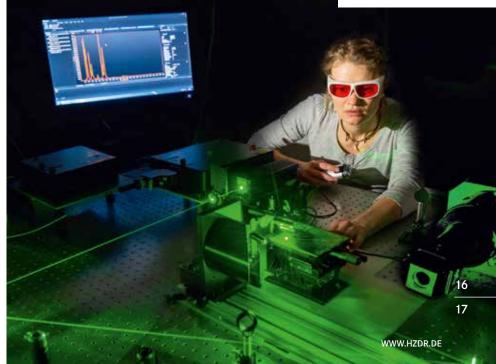
#### \_ KONTAKT

\_Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie am HZDR **Dr. Margret Fuchs** m.fuchs@hzdr.de

→ tu-freiberg.de/fakultaet2/angph

SIGNATUR: Die Geografin Margret Fuchs untersucht die fluoreszierenden Eigenschaften von Mineralen. Foto: Detlev Müller





// Bei der Fluoreszenzspektroskopie verraten Radionuklide, wie sie sich in Böden und Wasser verhalten.

#### WENN URAN AUF LASERBLITZE ANSPRICHT

TEXT . Uta Bilow

Hanford im US-Bundesstaat Washington gilt als einer der Orte auf der Welt, der am stärksten radioaktiv belastet ist. Etwa 50 Jahre lang betrieben die Amerikaner auf dem streng abgeschotteten Gelände Kernreaktoren und erzeugten dort Plutonium für Nuklearwaffen. Der letzte Reaktor wurde 1989 abgeschaltet. Seitdem sind umfangreiche Aufräumarbeiten im Gang, die auch die Dekontamination des weitläufigen Gebietes umfassen. Besonders heikel: Einige der unterirdischen

FACHMANN: Mit dieser Anlage kann Gerhard Geipel das charakteristische Leuchten bei Raumtemperatur in einer Zeitspanne von weniger als 100 Nanosekunden aufnehmen. Foto: Oliver Killig

Tanks, in denen viele Tonnen flüssiger Abfälle aus der Plutoniumextraktion lagern, zeigen bereits Korrosionserscheinungen. So gelangten Uran, Plutonium und andere Radionuklide ins Erdreich. Bei Messungen fand man heraus, dass sich vor allem Uran sehr weit ausgebreitet hat, während Plutonium und Curium eher lokal begrenzt in der Nähe der Tanks auftreten.

Warum das so ist, weiß Gerhard Geipel vom Institut für Ressourcenökologie am HZDR: "Uran wird im Erdreich oxidiert und liegt dann als Calciumuranylcarbonat vor. In dieser Form ist Uran gut wasserlöslich und wird deshalb leicht transportiert. Plutonium und Curium liegen dagegen in anderen Bindungsformen vor, die eher an festen Oberflächen gebunden werden."



Speziesanalytik - das ist das Schlagwort, das hinter diesen Erkenntnissen steckt. Und auf dem Gebiet der Speziesanalytik von Radionukliden gehören die HZDR-Forscher zur Weltspitze. Gerhard Geipel und seine Abteilung "Biogeochemie" untersuchen verschiedene Arten - Spezies - eines Elements, wobei die Art der Verbindung, in der das Element vorliegt, und die unterschiedlichen Oxidationsstufen berücksichtigt werden. "Mit den gängigen Analysemethoden wird in der Regel lediglich der Gesamtgehalt eines Elements nachgewiesen", sagt Geipel. "Aber bei Schwermetallen wie Quecksilber oder auch den radioaktiven Elementen ist eine Unterscheidung angebracht. Denn die verschiedenen Spezies haben ganz unterschiedliche Eigenschaften und verhalten sich abweichend, sei es im Stoffwechsel von Mensch und Tier sowie in anderen biologischen oder geologischen Systemen. Damit weisen die verschiedenen Spezies auch ganz unterschiedliche Toxizitäten auf."

#### Den Weg der Radionuklide verfolgen

Geipel und seine Kollegen wollen mithilfe der Speziesanalytik dazu beitragen, das Verhalten von Radionukliden in der Biosphäre vorherzusagen. Dazu untersuchen die Wissenschaftler, wie sich Uran und andere Radionuklide in verschiedenen

radioaktive Bestandteile ausbreiten. Anhand der Messwerte können die Wissenschaftler Risikoabschätzungen für das jeweilige untersuchte System treffen. Schließlich liefern die Untersuchungen auch eine Datenbasis, mit der sich nukleare Unfälle oder Dekontaminationsarbeiten wie die in Hanford besser bewältigen lassen.

#### Wie Pflanzen Uran aufnehmen

Seit mehr als 20 Jahren haben die Forscher am HZDR die nötige Technik zur Speziesanalyse von Uran und anderen Actiniden aufgebaut und immer weiter verfeinert. Wichtigstes Verfahren dabei ist die laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie. Das Institut verfügt über ein ganzes Arsenal an Lasersystemen, um die Verbindungen, die die Actiniden eingehen, genau bestimmen zu können. Der Chemiker Geipel erklärt das Prinzip der Fluoreszenzspektroskopie: "Die Energie des Laserlichts regt die Atome in der Probe an, und Elektronen in der Atomhülle werden auf energiereichere Niveaus angehoben. Wenn die Elektronen auf ihre ursprünglichen Niveaus zurückfallen, senden sie ihrerseits Licht aus." Diese Fluoreszenz wird mit einem Spektrographen und einem angeschlossenen speziellen Kamerasystem analysiert. So bestimmen die

#### Die Daten helfen bei der Suche nach einem möglichen Endlagerstandort.

naturnahen Modellsystemen verhalten. Mit ihren Untersuchungen liefern sie wichtige Daten für die Endlagerforschung. Denn für radioaktive Abfälle aus Atomkraftwerken wird in Deutschland derzeit nach einem Standort für ein Endlager gesucht, in dem die ausgedienten Brennstäbe, die vor allem aus Uran bestehen, über einen sehr langen Zeitraum von der Biosphäre isoliert werden können. Mögliche geologische Formationen dafür sind Tone, Salzstöcke oder kristalline Gesteine; sie gelten als geeignete Barrieren.

Wie verhalten sich aber die Abfälle, wenn Wasser in das Lager eindringt, die Behälter korrodieren und Radionuklide freigesetzt werden? In den Gesteinen herrschen sehr unterschiedliche Bedingungen, angefangen von möglichen Liganden, mit denen das Nuklid eine chemische Bindung eingehen kann, über den pH-Wert bis zu Druck, Temperatur und schließlich auch anwesenden Bakterien oder Pilzen. Dieses komplexe chemisch-physikalisch-biologische Milieu bestimmt, welche Spezies auftreten. Und das entscheidet wiederum darüber, ob die Radionuklide leicht transportiert werden oder eher unbeweglich sind.

Die gewonnenen Daten sind wichtig für die Beurteilung von möglichen Endlagern, aber auch für die Forschung zu ehemaligen Uran-Bergbaugebieten in Sachsen, wo man beispielsweise Halden untersucht und wissen möchte, wie sich deren HZDR-Forscher aus der Wellenlänge des emittierten Lichts und dessen Lebensdauer, welche Spezies in welcher Konzentration vorliegt.

"Das Verfahren eignet sich zum Beispiel sehr gut, um verschiedene Spezies von vierwertigem und sechswertigem Uran zu bestimmen", so Geipel. Jedes Ion spricht auf eine andere Anregungswellenlänge an, die am Laser exakt eingestellt werden kann. "Anhand der gemessenen Fluoreszenz können wir genau unterscheiden, wie das Uran gebunden ist." Untersucht werden in Dresden Erd- und Wasserproben, aber auch rein organisches Material. So stießen die Forscher auf eine Pflanze, die auf Bergbauhalden in Johanngeorgenstadt gedeiht und besonders hohe Uran-Gehalte aufweist. Durch Untersuchungen mit der Fluoreszenzspektroskopie konnten Geipel und seine Kollegen ermitteln, in welcher Form die Pflanze das Radionuklid aufnimmt und in den Zellen ablagert.

In der Bio- oder Geosphäre verbinden sich Radionuklide oftmals mit anorganischen Stoffgruppen wie Carbonat, Phosphat oder Arsenat. Doch kommen auch organische Substanzen als Liganden in Frage, etwa Bestandteile von Humus, Reste von Lösemitteln oder medizinische Abfälle. Um diese Metall-Organik-Komplexe zu untersuchen, greifen die Wissenschaftler auf die sogenannte Femtosekunden-Fluoreszenzspektroskopie zurück. Dabei werden durch einen ultrakurzen Laserpuls die

 $\rightarrow$ 

18

19

organischen Liganden zur Fluoreszenz angeregt. Das Radionuklid löscht diese Emission aus. "Über die Abnahme der Fluoreszenz können wir die Konzentration des Nuklids berechnen und die Stabilitätskonstante des Metall-Organik-Komplexes bestimmen", erläutert Gerhard Geipel. Dabei kommt eine Spezialkamera zum Einsatz. "Die Fluoreszenz klingt sehr schnell ab, das kann bereits nach 10 Nanosekunden vorbei sein", so der Chemiker. "Wir verwenden deshalb eine Kamera mit extrem kurzer Belichtungszeit. Sie stammt eigentlich aus der Automobilforschung; dort werden Verbrennungsvorgänge im Ottomotor verfolgt."

#### Laser plus Akustik

Nicht alle Radionuklide sind für die Fluoreszenzspektroskopie geeignet. Neptunium- und Plutonium-Spezies etwa lassen sich nicht zur Emission anregen. Bei diesen Proben greifen die HZDR-Forscher zu einem anderen Verfahren: der laserinduzierten photoakustischen Spektroskopie. Auch hierbei wird ein Laserpuls auf die Probe gelenkt, allerdings fällt die Antwort des Systems anders aus. "Dort, wo der Laserpuls auftrifft, erhöht sich die Temperatur der Probe. Ein winziger Effekt, aber wir können diese örtlich begrenzte Erwärmung messen", erklärt Geipel. "Denn sie führt zu einer Druckwelle, die wir mittels eines piezokeramischen Sensors in ein elektrisches Signal umwandeln können." Die Probe wird mit Laserpulsen verschiedener Wellenlänge bestrahlt. Spricht sie

auf eine bestimmte Wellenlänge an, erhalten die Forscher ein aussagekräftiges Absorptionsspektrum. Das Messverfahren ist besonders empfindlich. So wurden am HZDR kürzlich Sickerwässer von Bergbauhalden untersucht, in denen Nuklidgehalte von weitaus weniger als 2 ppm (parts per million) nachgewiesen werden konnten.

Neben der Laborarbeit hat Gerhard Geipel derzeit noch andere Aufgaben auf dem Tisch: Er organisiert gerade das internationale BioMetals-Symposium, das im Juli 2016 in Dresden stattfinden wird. Bei der Expertenkonferenz treffen sich alle zwei Jahre die Spezialisten auf dem Gebiet der Wechselwirkung von Metallen in der Biologie. Dass Dresden nun erstmals Standort für das Symposium sein wird, unterstreicht die Kompetenz der HZDR-Forscher.

#### PUBLIKATIONEN:

G. Geipel: "Some aspects of actinide speciation by laser-induced spectroscopy", in Coordination Chemistry 2006 (DOI: 10.1016/j.ccr.2005.11.007)

G. Geipel, K. Viehweger: "Speciation of uranium in compartments of living cells", in Biometals 2015 (DOI: 10.1007/s10534-015-9836-x)

Y. Wang, M. Frutschi, E. Suvorova, V. Phrommavanh, M. Descostes, A. A.A. Osman, G. Geipel, R. Bernier-Latmani: "Mobile uranium(IV)-bearing colloids in a mining-impacted wetland", in Nature Communications 2013 (DOI: 10.1038/ncomms3942)



FLÜSSIG: Wellenlänge und Lebensdauer des ausgesendeten Lichts verraten nicht nur, um welches Radionuklid es sich in der flüssigen Probe handelt, sondern auch, welche Spezies genau vorliegt. Foto: Oliver Killig

#### KONTAKT

\_Institut für Ressourcenökologie am HZDR **Dr. Gerhard Geipel** g.geipel@hzdr.de // Auf dem Gebiet der Flotation, einem Aufbereitungsverfahren für Metallerze und Industrieminerale, besteht seit über 50 Jahren ein erfolgreiches Netz, das sich zwischen Australien, Kanada, den USA, Brasilien, Chile und Südafrika spannt – weitestgehend ohne europäische Beteiligung. Ein neues EU-Projekt unter Federführung des HZDR will das nun ändern und ein ähnlich starkes Netzwerk in Europa aufbauen.



NetFlot: Johanna Lippmann-Pipke und Martin Rudolph an einer Flotationszelle im Freiberger Labor. Foto: Detlev Müller

## ROHSTOFFAUFBEREITUNG IN EUROPA: GEMEINSAM SIND SIE STARK

\_TEXT . Sara Schmiedel

Das HZDR bündelt 14 Partner aus Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Finnland, Polen, Belgien und den Niederlanden seit 1. Januar dieses Jahres in dem EU-Projekt NetFlot. Das Ziel des neuen Netzwerkes ist es, die europäischen Kompetenzen auf dem Gebiet der Flotation zu stärken. Vereinfacht gesagt, wird bei der Flotation Erzgestein zuerst fein gemahlen und anschließend mit Wasser und verschiedensten Chemikalien vermengt. Die gewünschten Erzpartikel werden damit schlecht benetzbar gemacht, lagern sich an eingetragenen Luftblasen an und werden nach oben befördert. Sie können so von den restlichen Bestandteilen als Metallkonzentrat abgetrennt werden.

Partner im NetFlot-Projekt sind Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen – unter ihnen weltweit bedeutende Firmen im Bereich Erzgewinnung und -aufbereitung. Sie alle verfügen über verschiedene Geräte, Methoden und Messtechniken, mit deren Hilfe Flotationsprozesse untersucht, modelliert und durchgeführt werden können. Diese Infrastrukturen sollen – sind die Partner erst einmal gut vernetzt – gemeinsam genutzt werden und auch externen Interessenten zur Verfügung stehen. "Zum Aufbau dieses Infrastruktur-Netzwerkes bekommen wir Geld für Reisekosten und eine halbe Personalstelle. Forschung und Entwicklung selbst werden nicht finanziell unterstützt; hier arbeiten wir mit

 $\rightarrow$ 

20

21



ANALYSE: Doktorand Bent Babel demonstriert der Physikerin Johanna Lippmann-Pipke (links) und Heike Hildebrand, Managerin des NetFlot-Projekts, ein aktuelles Ergebnis am Raman-Spektroskop. Foto: Detlev Müller

unseren vorhandenen Mitteln", sagt Johanna Lippmann-Pipke, Projektkoordinatorin und Physikerin am Institut für Ressourcenökologie des HZDR.

#### Eine zentrale europäische Anlaufstelle

Das Projekt startet engagiert: "Am Ende des ersten Jahres müssen die vorhandenen Infrastrukturen und Modelle auf allen Skalen – von der molekularen bis zur Industrieskala – identifiziert und konzeptionell zusammengefügt sein sowie eine Website online gehen", so Johanna Lippmann-Pipke. Dafür müssen die jeweiligen Stärken der Partner systematisch dargestellt und für externe Interessenten aufbereitet werden.

Der Internetauftritt soll als zentrale Anlaufstelle für NetFlot fungieren und Anfragen, wie beispielweise zum Buchen von Experimentierzeit, direkt zum entsprechenden Projektpartner leiten. "Unser Ziel ist, dass möglichst viele Wissenschaftler und Unternehmen von den oft teuren Infrastrukturen und wertvollen Expertisen der Partner profitieren. Europa soll auf diesem wichtigen Gebiet voranschreiten", fasst die Projektleiterin zusammen.

## Flotation – ein altes Verfahren mit Verbesserungsbedarf

Die Flotation wird bereits seit dem Ende des 19. Jahrhunderts genutzt, um Metalle aus Erzgestein anzureichern. Bestrebungen nach einer günstigeren und effizienteren Umsetzung gibt es aber nach wie vor. "Die verfügbare Qualität der noch vorhandenen Erze nimmt durch den massiven Abbau der letzten Jahrzehnte immer mehr ab, der Bedarf an Rohstoffen wächst hingegen gigantisch. Man braucht effizientere Technologien, damit sich auch der Abbau komplexer oder schwer zugänglicher Lagerstätten finanziell überhaupt lohnt", erläutert Johanna Lippmann-Pipke.

Das HZDR ist gleich mit drei Instituten im Projekt beteiligt: Neben dem Institut für Ressourcenökologie steuern auch das Institut für Fluiddynamik und das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie ihre Kompetenzen bei. Lippmann-Pipke: "Schon bevor es überhaupt eine Ausschreibung gab, hatten wir die Idee, gemeinsam am Thema Flotation experimentell und mit Modellansätzen zu arbeiten." Die erste Ausschreibungsrunde des Europäischen Instituts für Innovation und Technologie für den Rohstoffsektor (EIT Raw Materials, siehe Kasten auf Seite 23) kam da gerade recht.

#### Strömung aus Partikeln und Gasblasen

Während Geoökologin Heike Hildebrand als NetFlot-Projektmanagerin ihre Fachkompetenz zum Transportverhalten von Partikeln in hochkomplexen Systemen einbringt, liegen die Stärken des Teams um Uwe Hampel ganz klar in fundamentalen Studien zu Mehrphasen-Strömungen und Wechselwirkungen zwischen Gasblasen und Partikeln, also kleinsten, in Flüssigkeit schwimmenden Teilchen. So beschäftigen sich die Wissenschaftler etwa mit der Aufgabe, ein grundlegendes Verständnis für die fluiddynamischen Transportvorgänge in Flotationssystemen zu erlangen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wollen die NetFlot-Partner Berechnungsverfahren für Strömungen entwickeln, um die Effizienz von Flotationsapparaten zu steigern.

"Zwar funktioniert die Flotation seit Jahrzehnten, ein klares und einheitliches physikalisches und chemisches Verständnis dafür gibt es aber noch nicht", erklärt der Freiberger Aufbereitungsexperte Martin Rudolph. "Um die Prozesse weiter zu optimieren, muss man sie jedoch erst einmal grundlegend verstanden haben." Deswegen arbeiten er und sein Team beispielsweise daran, die an der Flotation beteiligten Minerale mithilfe eines Rasterkraftmikroskops zu charakterisieren.



ÜBERLAUF: Experiment an einer Flotationszelle. Foto: Detlev Müller

Ihr Ziel: die Ausbeute und Reinheit bei der Erzaufbereitung zu erhöhen. Dafür führen sie Experimente im kleinen Maßstab durch. "Für Upscaling-Probleme, also das Hochrechnen unserer Erkenntnisse auf industrielle Maßstäbe, erhoffen wir uns Unterstützung von den NetFlot-Partnern", sagt der Verfahrenstechniker. Die Projektpartner am HZDR sind sich jedenfalls sicher, dass man ein umfassendes Konzept nur gemeinsam auf europäischer Ebene erarbeiten kann.

#### KONTAKT

\_Institut für Ressourcenökologie am HZDR
Dr. Johanna Lippmann-Pipke | Dr. Heike Hildebrand
netflot@hzdr.de

\_Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie am HZDR **Dr. Martin Rudolph** m.rudolph@hzdr.de

\_Institut für Fluiddynamik am HZDR Prof. Uwe Hampel u.hampel@hzdr.de

u.namperenzur.ue



#### **Europas neues Rohstoff-Netzwerk**

Das Europäische Institut für Innovation und Technologie (EIT) hat Ende 2014 ein Konsortium damit beauftragt, eine Wissens- und Innovationsgemeinschaft (Knowledge and Innovation Community, KIC) für den europäischen Rohstoffsektor zu etablieren. Das Netzwerk mit dem Namen EIT RawMaterials besteht derzeit aus rund 100 Partnern aus 19 europäischen Staaten, die gemeinsam Lösungsansätze für eine nachhaltige Rohstoffversorgung entwickeln. Es unterstützt Firmen und Forscher dabei, neuartige Produkte und Technologien schneller auf den Markt zu bringen, zugleich soll es den Unternehmergeist des Nachwuchses stärken. Ziel ist es, Europas Rohstoffsektor im internationalen Vergleich wettbewerbsfähiger und für innovative Unternehmen sowie exzellente Forscher attraktiver zu machen.

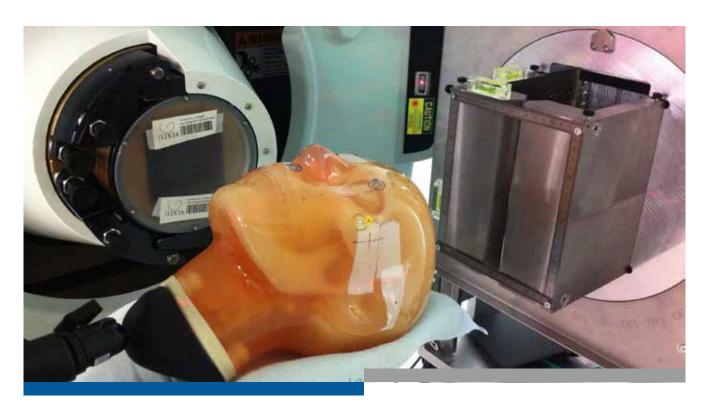
Im Gründungsjahr 2015 hat sich das weltweit größte Rohstoff-Konsortium unter der Koordination von HZDR und Fraunhofer-Gesellschaft vorrangig dem Aufbau seiner Organisationsstruktur gewidmet. Seit Anfang 2016 ist die EIT RawMaterials GmbH ein eigenständiges Unternehmen. Jens Gutzmer, Direktor am Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie und bis Sommer 2015 Interims-CEO, übergab den Staffelstab an den neuen Geschäftsführer, Dr. Ernst Lutz. Außerdem konnten alle Führungsposten in der Geschäftsleitung und in den sechs regionalen Zentren besetzt werden. Mit diesen Zentren bündelt EIT RawMaterials – von seinem Hauptsitz in Berlin aus – europäische Regionen nach Themenschwerpunkten.

EIT RawMaterials hat in seinem ersten Jahr mehrere Fördermaßnahmen definiert, die es den Partnern unter anderem ermöglichen, Technologien in die Praxis umzusetzen oder Infrastrukturen wie etwa Labore und Anlagen miteinander zu vernetzen. Zudem wurde ein transparenter Bewertungsprozess erarbeitet, der neue Projektvorschläge – beispielsweise die Entwicklung eines marktreifen Recyclingverfahrens - stringent bewertet und bereits laufende Projekte überwacht. So soll sichergestellt werden, dass nur die qualitativ besten Technologien oder Produkte gefördert werden. Bis 2018 will EIT RawMaterials bei der Gründung von mindestens 16 Start-ups beteiligt sein. Bis 2022 sollen mehr als 10.000 neue Arbeitsplätze im Rohstoffsektor geschaffen werden sowie rund 8.000 Entrepreneure eine zertifizierte Aus- und Weiterbildung durchlaufen haben. \_TS

// Wie tief eine Strahlentherapie mit Protonen in den Körper eines Krebspatienten eindringt, ließ sich bislang nicht messen. Eine Schlitzkamera, entwickelt von der Firma Ion Beam Applications (IBA) und erstmals klinisch erprobt durch ein Dresdner Forschungsteam, kann dieses Problem lösen und Patienten das unnötige Bestrahlen gesunden Gewebes ersparen.

#### **AUF DER SPUR DER PROTONEN**

Text . Sascha Karberg



SIMULATION: Letzte Tests am Kopfphantom in Behandlungsposition machen die Schlitzkamera fit für den Einsatz am Menschen. Foto: OncoRay

Wenn Ärzte Krebspatienten mit Protonenstrahlen behandeln, dann wenden sie eine Bestrahlungstechnik an, die als die zurzeit präziseste überhaupt gilt. Denn während harte Röntgenstrahlen auch das gesunde Gewebe vor, neben und hinter einem Tumor belasten, kann ein Protonenstrahl so gesteuert werden, dass er seine zerstörerische Energie fast nur im Krebsgewebe abgibt. Vorausgesetzt, die Reichweite wurde korrekt berechnet. Überprüfen ließ sich das während der Bestrahlung aber bisher nicht. Dieses Problem hat ein Forscherteam des Dresdner OncoRay-Zentrums, der Firma IBA Ion Beam Applications und des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf nun gelöst – mithilfe einer besonderen Kamera, der Prompt-Gamma-Kamera.

"Bisher gab es keine Möglichkeit, auf den Millimeter genau zu messen, wie tief die Protonen bei einer Bestrahlung in den Tumor eindringen", sagt Christian Richter, Leiter der Arbeitsgruppe "Hochpräzisions-Strahlentherapie" am OncoRay. Zwar lässt sich vorausberechnen, wie tief der Strahl in einen homogenen Wassertank eindringt. "Aber ein Patient ist eben kein Wassertank, sondern besteht aus unterschiedlich dichten Geweben, die den Protonenstrahl unterschiedlich stark abbremsen." Für die klinische Anwendung der Protonenstrahlen hat das drastische Auswirkungen. Denn wenn der Arzt nicht genau weiß, ob der Strahl den Rand des Tumors erreicht oder darüber hinaus schießt, muss er vorsichtshalber tiefer und mehr Gewebe bestrahlen, um sicher sein zu können, alle Krebszellen zu erreichen. "Diese Unsicherheit in der Reichweite kann bis zu 10 Millimeter betragen, bei sehr großen Reichweiten sogar noch etwas mehr", sagt Richter. Das heißt, der Arzt ist gezwungen, bis zu 10 Millimeter über den Tumor hinaus zu bestrahlen - und damit möglicherweise fingerdick gesundes Gewebe zu schädigen statt nur die Krebszellen. "Die Reichweiten-Unschärfe schmälert die Vorteile der Protonentherapie in der klinischen Anwendung bisher erheblich." →

#### Protonen, die Wellen machen

Richters Team hat nun einen großen Schritt voran gemacht auf dem Weg zur Lösung des Problems. So wie ein in den Teich geworfener Stein Wellen auf der Wasseroberfläche erzeugt, so verursachen auch die Protonen an dem Ort, wo sie im Körper des Patienten "landen" und ihre zerstörerische Energie abladen, Gammawellen, die sogenannte prompte Gamma-Strahlung. Diese Strahlung fangen die Forscher mit einer Schlitzkamera – einem Detektor für Gammastrahlen – auf. "Die Gammastrahlen sagen uns, wo die Protonen gerade im Körper sind", erklärt Guntram Pausch, Leiter der Forschungsgruppe "In-vivo-Dosimetrie" am OncoRay. Dazu werden die Gammastrahlen, die durch den Protonenstrahl erzeugt wurden, auf einer Detektorebene abgebildet. "Dadurch bekommt man die Information über die Kante, also die Stelle, wo die Gammastrahlung plötzlich abfällt, weil der Protonenstrahl stoppt."

Zwar gibt es noch andere Methoden, mit denen über diese "Kante" die Eindringtiefe des Protonenstrahls gemessen werden kann. Doch die seien entweder zu langsam, um Ergebnisse noch während der Bestrahlung zu liefern, oder noch nicht so weit entwickelt, dass sie am Menschen eingesetzt werden können. Die erste Bewährungsprobe hat die neue Schlitzkamera bereits bestanden. Mitte August 2015 wurden damit die ersten Messungen während der Bestrahlung eines Patienten mit Kopf-Hals-Tumor durchgeführt.

Vorher hatten die Forscher unzählige Experimente an Plexiglas und Gewebe-Phantomen gemacht, um die Kamera fit für den Einsatz am Menschen zu machen. "Plexiglas besteht aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, ist dem Menschen also sehr ähnlich", sagt Marlen Priegnitz vom Institut für Strahlenphysik am HZDR. "Man fängt an mit Blöcken, Quadern und Zylindern und macht dann mit gewebeäquivalenten Materialien weiter, die Fett-, Lungen-, Muskelgewebe oder Hirn simulieren sollen." Indem die Forscher die Phantome mit Protonen bestrahlten und gezielt bekannte Veränderungen einbauten, konnten sie experimentell nachweisen, dass die zu erwartenden Reichweiten-Abänderungen mit der Kamera messbar sind. Erst dann wagten sie den Einsatz des Detektors in der Klinik.

#### Ungenauigkeit halbiert

"Der Patient wusste, dass ihm die Messung mit der Schlitz-kamera nicht schadet, ihm selbst aber auch nicht nützt, sondern bestenfalls der nächsten Generation von Patienten", betont Richter. Zwar dauerte die Behandlung etwas länger, aber nur, weil vor der Bestrahlung die Schlitzkamera ein paar Minuten positioniert werden musste. "Wir konnten mit der Schlitzkamera feststellen, dass die gemessene Reichweite des Protonenstrahls an verschiedenen Bestrahlungstagen in einem Bereich von nicht mehr als plus-minus zwei Millimeter schwankte", so Richter. Ein großer Unterschied zu der Reichweiten-Unschärfe, mit der Strahlentherapeuten derzeit arbeiten müssen. "Im konkreten Patienten betrug die geschätzte Unsicherheit der Protonenreichweite bisher sieben Millimeter. Man muss also sieben Millimeter tiefer bestrahlen,

damit der Tumor sicher getroffen wird", erläutert Pausch. "Mit der Kamera könnten wir das in dieser Perspektive auf drei bis vier Millimeter begrenzen. Davon würden die Patienten profitieren."

Auch wenn ein Unterschied von wenigen Millimetern nicht danach klingt, als ob er so viel forscherischen Aufwand nötig mache - im Gehirn kann das Bestrahlen einer Gewebeschicht von Apfelsinenschalen-Stärke den Unterschied machen, ob ein Patient mit einem Hirntumor neben dem Sprachzentrum nach der Therapie noch sprechen kann oder nicht. "Und je tiefer ich in den Patienten einstrahle, umso größer ist die Reichweiten-Unsicherheit", ergänzt Richter. "Wird zum Beispiel die Prostata bestrahlt, dann hat der Protonenstrahl eine Reichweite von 25 Zentimetern, was eine Unsicherheit von über 10 Millimetern zur Folge hat." Umso wichtiger sei es, während solcher mehrwöchigen Behandlungen kontinuierlich die Reichweite des Protonenstrahls zu messen. Die Prompt-Gamma-Kamera, dessen Prototyp die Firma IBA entwickelt und mit dem Dresdner Team gemeinsam erprobt hat, ermöglicht das. Das OncoRay-Zentrum bietet für solche patientennahen und zugleich kernphysikalischen Forschungsprojekte den perfekten Rahmen, wird es doch von Universitätsklinikum, TU Dresden und HZDR gemeinsam getragen.

Das Ziel sei, so Pausch, die Schlitzkamera in die Protonenstrahl-Geräte einzubauen. Bisher müssen die Forscher ihren Detektor noch per Hand im rechten Winkel zur Richtung des Protonenstrahls ausrichten. Künftig soll die Schlitzkamera ihre Messdaten automatisch weiterleiten und die Bestrahlung abbrechen, wenn der Protonenstrahl zu tief eindringt. "Davon sind wir aber noch weit entfernt", sagt Pausch. Ein kurzfristig erreichbarer Erfolg wäre schon, mit der Schlitzkamera Erfahrungen darüber zu sammeln, inwieweit die theoretische Planung einer Bestrahlungstiefe am Ende mit der realen Behandlung des Patienten übereinstimmt. "Schon wenn man lernt, dass die Berechnung in 99,9 Prozent der Fälle mit der Planung übereinstimmt oder wie sie abgeändert werden muss, müsste man nicht mehr so viel gesundes Gewebe um den Tumor herum bestrahlen." Und den Patienten wäre geholfen.

#### PUBLIKATION:

C. Richter, G. Pausch, S. Barczyk, M. Priegnitz u.a.: "First clinical application of a prompt gamma based in vivo proton range verification system", in Radiotherapy and Oncology 2016 (DOI: 10.1016/j.radonc.2016.01.004)

#### KONTAKT

\_Nationales Zentrum für Strahlenforschung in der Onkologie – OncoRay "Hochpräzisions-Strahlentherapie" Dr. Christian Richter christian.richter@oncoray.de

"In-vivo-Dosimetrie" Dr. Guntram Pausch guntram.pausch@oncoray.de

\_Institut für Strahlenphysik am HZDR Dr. Marlen Priegnitz m.priegnitz@hzdr.de // Dunkle Materie ist überall, auch wenn es bisher noch nicht gelungen ist, sie nachzuweisen. Sie könnte, so eine gängige Theorie, aus sogenannten WIMPs bestehen. Diese schwach wechselwirkenden Teilchen (Weakly Interacting Massive Particles) sollen uns unbemerkt durchqueren – und das millionenfach pro Sekunde.

### NUR ZWEI ODER DREI EREIGNISSE PRO JAHR

TEXT . Christine Bohnet

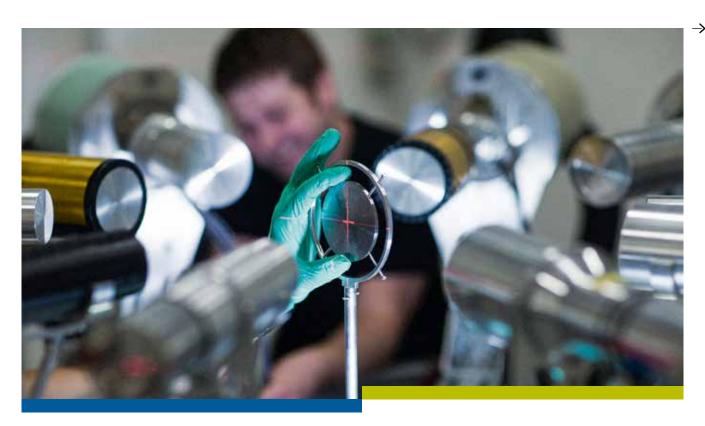
Das größte Untergrundlabor für Astrophysik befindet sich im italienischen Gran-Sasso-Massiv. Physiker aus aller Welt suchen dort, durch mehr als einen Kilometer Fels von der Umgebung abgeschirmt, nach Anzeichen der mysteriösen Dunklen Materie. Die Abschirmung ist notwendig, damit die hochempfindlichen Detektoren untertage möglichst nur Signale der unbekannten Teilchen aufzeichnen. Doch es gibt einen Störenfried: die natürliche Radioaktivität.

Das chemische Element Uran kommt überall auf der Erde im Gestein vor. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Uran-238, das ebenso wie alle weiteren Uran-Isotope nach einem gewissen zeitlichen Schema zerfällt. Allerdings ist dieses für

TARGET: An der Neutronenquelle nELBE lässt sich herausfinden, wie genau Neutronen mit Materie wechselwirken. Foto: Oliver Killig

Uran-238 viele Milliarden Jahre lang, liegt dessen Halbwertszeit doch bei mehr als vier Milliarden Jahren. Bei jedem Zerfall entstehen neue Atome und Teilchen – Uran-238 zerfällt über die sogenannte Uran-Radium-Reihe, an deren Ende ein stabiles Blei-Isotop steht. Wichtig zu wissen: Beim Zerfall werden energetische Alpha-Teilchen ausgesendet, die über Kernreaktionen in der Umgebung Neutronen erzeugen.

Die Neutronen tief im Inneren des Gran-Sasso-Massivs stammen einerseits von Resten der natürlichen Radioaktivität. Sie entstehen andererseits aber auch in den Abschirm-Materialien rund um die Detektoren untertage. So können diese Teilchen ihren Weg auch zu den Detektoren des Italienischen Nationalen Instituts für Kernphysik (INFN) und zu denen der internationalen Partner finden. Hierzu zählt die Universität Mainz, die maßgeblich an Entwicklung und Betrieb eines neuen Xenon-Detektors beteiligt ist. Dieser besteht aus 3.500 Litern des flüssigen Edelgases, umhüllt von einem zehn Meter hohen Tank. An dem XENON1T-Experiment im Gran-Sasso-Labor arbeiten Wissenschaftler aus weltweit 21 Instituten mit.



WWW.HZDR.DE

#### Neutronen oder WIMPs - das ist die Frage

Registriert der Xenon-Detektor ein Ereignis, handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht um ein WIMP, sondern um ein schnelles Neutron. "Deshalb hat die Gruppe von Uwe Oberlack aus Mainz einen kleinen Xenon-Detektor für Experimente an unserer Neutronenquelle nELBE aufgebaut. Und wir möchten nun verstehen, wie der Detektor die Spreu vom Weizen trennen kann", so der HZDR-Physiker Andreas Wagner.

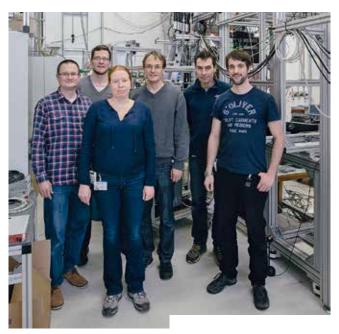
Der maßstabsgetreue Detektor aus Mainz erinnert an eine Thermosflasche aus Stahl, dabei funktioniert er genauso wie sein großer Bruder in Italien. Das bei rund -170 Grad Celsius flüssige Xenon sendet Licht aus, sobald ein Teilchen auf eines der Xenon-Atome trifft. Genauer gesagt, regt ein auftreffendes Teilchen das Xenon-Atom energetisch an, das Szintillationsstrahlung abgibt, wenn es sich zurück in den Ursprungszustand begibt. Mehrere Lichtsensoren registrieren und verstärken dieses Licht. Mit den schnellen Neutronen aus der nELBE-Quelle können nun genau die Reaktionen untersucht werden, die im Untertagelabor den Nachweis der WIMPs stören werden.

#### Flugzeit, Energie und Winkel

Die Neutronenquelle am HZDR wird mithilfe des intensiven Elektronenstrahls vom ELBE-Beschleuniger getrieben. Dieser "Strahl", der eigentlich aus vielen einzelnen Elektronenpaketen besteht, trifft im Neutronenlabor auf eine Anordnung aus flüssigem Blei. Dort entstehen beim Abbremsen der Elektronen pro Sekunde etwa 100 Milliarden Neutronen. Das Besondere der Neutronenquelle nELBE erläutert der dafür zuständige Wissenschaftler Arnd Junghans: "Dank der genauen Taktung der Elektronenpulse lässt sich die Flugzeit der Neutronen und damit ihre Geschwindigkeit und Energie präzise bestimmen. Da sich die Strahlparameter und damit der Neutronenfluss zudem wunschgemäß einstellen lassen, ist unsere Neutronenquelle ein perfektes Werkzeug für die Detektor-Forschung."

Zu der mehrwöchigen Experimentierserie mit dem Minidetektor waren eigens drei Doktoranden aus Mainz angereist. "Im Ergebnis kennen wir nun die energieabhängige Empfindlichkeit des Xenon-Detektors", sagt Andreas Wagner. Dieses Wissen hilft den Wissenschaftlern des XENON1T-Experiments, die potenziellen Kandidaten für die Dunkle Materie von den schnellen Neutronen zu unterscheiden, die untertage durch den Uranzerfall entstehen.

Doch damit nicht genug der Kernphysik. Die leichten Neutronen können direkt auf die etwa 130fach schwereren Xenon-Kerne treffen. Bei solch einem zentralen Stoß überträgt das Neutron viel Energie auf den Atomkern. Bei einem seitlichen Abpraller fliegt das Neutron dagegen in Vorwärtsrichtung weiter, verliert nur wenig Energie und verlässt den Detektor in einem bestimmten Winkel. "Deshalb haben wir extra zehn Neutronen-Detektoren gebaut", so Wagner. "Wir können also zwei Parameter auswerten, die Flugzeit und den Winkel, der uns die auf den Kern übertragene Energie verrät."



GEMEINSAM: Den WIMPs auf die Spur kommen wollen Andreas Wagner und Toni Kögler (HZDR), Melanie Scheibelhut (Uni Mainz), Arnd Junghans (HZDR), Uwe Oberlack sowie Pierre Sissol (Uni Mainz; v.l.n.r.). Foto: Oliver Killig

#### Dunkle Materie in der Überzahl

Vieles deutet darauf hin, dass ein überwiegender Teil der Materie, die uns umgibt, aus Dunkler Materie besteht. "Nehmen wir zum Beispiel die Umdrehungsgeschwindigkeit einer Galaxie. Wie schnell bewegen sich die Arme der Galaxie um das Zentrum herum? Ohne die Existenz der Dunklen Materie könnte man die errechnete Geschwindigkeit nicht mit der beobachteten Masseverteilung in Einklang bringen", erläutert Wagner.

Dank des Rossendorfer Fachwissens rund um Teilchen im Allgemeinen und Neutronen im Besonderen sind die am XENON1T-Experiment beteiligten Wissenschaftler nun einen wichtigen Schritt weiter auf der Suche nach der Dunklen Materie. Sollte sich die Theorie der schwach wechselwirkenden Teilchen, der WIMPs also, bestätigen, so dürften sie sich auf der sicheren Seite befinden, sollten sie eines Tages in Jubel über die ersten gemessenen WIMP-Signale ausbrechen. Da die Experten aber nur mit zwei bis drei Ereignissen pro Jahr rechnen, kann dies noch eine ganze Weile dauern.

#### KONTAKT

\_Institut für Strahlenphysik am HZDR
Dr. Andreas Wagner | Dr. Arnd Junghans
a.wagner@hzdr.de | a.junghans@hzdr.de

\_Johannes Gutenberg-Universität Mainz Prof. Uwe Oberlack oberlack@uni-mainz.de

√ www.xenon1t.org

// Drei junge Wissenschaftler nehmen die Wärmeübertragung beim Sieden und Kondensieren unter die Lupe. Ihre Erkenntnisse könnten die Sicherheit in kerntechnischen Anlagen verbessern und Kühlsysteme sowie Energieerzeugung effizienter machen.



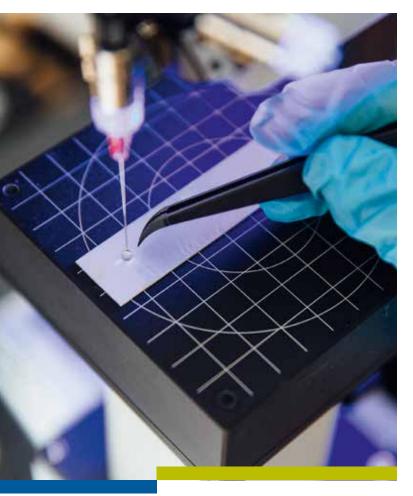
## HEISSER DAMPF UND KÜHLE TROPFEN

\_Text . Inge Gerdes

Das Metallstück sieht aus wie ein kleiner grauer Igel. Innen ist es hohl. Für Sebastian Unger verkörpert es einen Lösungsansatz für einen effizienten Kühlkreislauf, der ohne Strom auskommt. Das ist für die Sicherheit von Kernkraftwerken von entscheidender Bedeutung, aber auch für viele andere Anwendungen maßgebend. Im Rahmen seiner Promotion arbeitet der junge Wissenschaftler seit einem Jahr an dem Thema "Wärmeübertragungssysteme für verbesserte passive Kühlung in nuklearen Systemen". Dabei geht es vor allem um die Kühlung der Brennelemente-Lagerbecken bei Havarie und Stromausfall. "Für mich ist es spannend, mein ingenieurtechnisches Know-how zu nutzen, um verfahrens- und energietechnische Probleme zu lösen", beschreibt der 27-Jährige seine Motivation. Er hat Energietechnik an der TU Dresden studiert und sich auf Thermodynamik spezialisiert.

Die Wärme aus Kernenergie entsteht durch kontrollierte Kernspaltung und radioaktiven Zerfall in den Brennelementen des Reaktors. Abgebrannte Brennelemente werden ausgetauscht. Da sie durch Nachzerfallsprozesse aber weiterhin sehr viel Wärme freisetzen, müssen sie in Lagerbecken innerhalb des Kraftwerkes noch etwa fünf Jahre lang gekühlt werden. Fällt die Kühlung aus, steigt die Temperatur im Becken schnell an, und es wird gefährlich. Die Brennelemente können sich so stark aufheizen, dass es schließlich zum Brand und zum Aufschmelzen der Brennstabhüllen und in der Folge zum Freisetzen radioaktiver Stoffe kommen kann. Damit das nicht passiert, muss die Kühlung der Abklingbecken unter allen Umständen sichergestellt sein. Fallen die Pumpen mangels Strom aus, müssen sogenannte passive Sicherheitssysteme einspringen.

GRUNDLAGEN: Ein Wassertropfen auf einer beschichteten Edelstahl-Probe dient dazu, die Benetzbarkeit zwischen Probe und Flüssigkeit zu messen. Ziel ist die Optimierung von Verdampfungs- und Kondensationsprozessen. Foto: Oliver Killig



Hier kommt nun der Igel von Sebastian Unger ins Spiel. Um das Zusammenwirken von Strömung und Wärmeübertragung zu optimieren, setzt der Doktorand bei den Kühlrohren an. Der Igel ist nichts anderes als das Beispiel einer unkonventionellen Wärmeübertragungsstruktur. Mit einer vergrößerten Außenfläche und einer speziellen Beschichtung im Inneren des Rohres soll eine möglichst effiziente Wärmeabführung erreicht werden.

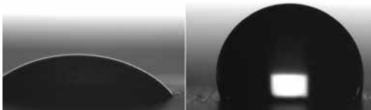
#### Vielversprechende Beschichtung

Bei einem passiven Kühlsystem entsteht der Umlauf allein durch die Dichtedifferenz des Kühlmediums – meist Wasser. Heißer Wasserdampf strömt in den Kühler, kondensiert an der Wand und fließt als Wasser zurück. Je niedriger die Temperaturdifferenz, desto geringer sind die "Antriebskräfte" im Umlauf. Damit die Notkühlung trotzdem effektiv arbeitet, kommt es darauf an, Wärmewiderstände zu minimieren und die Kondensation zu verbessern. Einen vielversprechenden Ansatz fand Sebastian Unger mit einer dünnen, hydrophoben

Beschichtung der Kühlrohr-Innenseite. Sie soll dafür sorgen, dass die kondensierten Wassertropfen schnell ablaufen und keinen Film bilden, der die Wärmeübertragung für den nachströmenden Dampf behindert.

Auf der Suche nach einer geeigneten Beschichtungstechnik wandte sich Sebastian Unger an einen Spezialisten im HZDR, den Elektrochemiker Ulrich Harm. Er kennt sich mit nasschemischen Verfahren aus - eine für die Anwendung besonders günstige Methode, das Innere eines Rohres zu beschichten. Dabei wird eine besondere Eigenschaft von Metallen genutzt: Sie bilden an der Oberfläche eine dünne Oxidschicht aus. Wird ein Metallrohr in das Beschichtungsbad getaucht, lagert sich eine einlagige Molekülschicht - "Monolayer" genannt - an diese Oxidschicht. Die so entstandene Beschichtung begünstigt die Bildung von Wassertropfen und sorgt somit dafür, dass die Fläche nur wenig benetzt wird. "Das ist ähnlich wie beim Lotuseffekt", erklärt der Doktorand. "Da die Monolayer-Beschichtung nur zwischen einigen Ångström und zwei Nanometern dick ist, verbessert sie den Wärmeübergang bei der Kondensation, ohne einen zusätzlichen Wärmeleitwiderstand zu erzeugen."

Um die passende Beschichtung zu finden, wurden zur Einstellung der gewünschten Benetzbarkeit und Wärmebeständigkeit verschiedene Chemikalien und Oberflächenstrukturen getestet. Bisherige Untersuchungen beziehen sich auf beschichtetes Kupfer oder Gold, das im kleinen Maßstab, vor allem in der Elektronik, zum Einsatz kommt. In Kraftwerken dagegen wird meist Stahl und Aluminium verwendet. Mit der hydrophoben Beschichtung von Stahl betreten die HZDR-Forscher daher Neuland. Erste Ergebnisse will der Doktorand noch in diesem Jahr veröffentlichen.



BESCHICHTUNG: Einfacher Stahl ist gut benetzbar – der Tropfen "liegt flach" auf der Oberfläche. Dagegen stößt im rechten Bild die Oberfläche den Tropfen ab.

#### Igel aus dem Drucker

Bei einem passiven Kühlsystem bleibt oft nur die Möglichkeit, Wärme an die Umgebungsluft abzugeben. Um hier Wärme-übertragung und Luftzirkulation zu verbessern, entwickelte Sebastian Unger ein besonderes Oberflächendesign. Er hat die Außenseite des Rohres mit vielen dünnen Stacheln versehen und damit die Austauschfläche vergrößert. Bei seiner stacheligen Wärmeübertragungsstruktur setzt der junge Forscher auf die neuartige additive Fertigung, allgemein bekannt als 3-D-Druck. Weil das auch mit Metall funktioniert, bietet diese Technologie viel kreativen Freiraum, spezielle Bauteile zu gestalten, die sich relativ preisgünstig fertigen lassen. So

28

29

konnte er die optimale Form berechnen und das kleine Modell am Institut für Werkstoffwissenschaften der TU Dresden herstellen lassen.

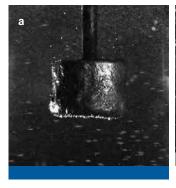
Schon bald soll ein etwa 35 cm langes Stück des "Igelrohrs" im Strömungskanal getestet werden. "Das werde ich von innen beheizen und messen, wie gut die Wärme abgeführt wird", sagt Sebastian Unger. "Die Ergebnisse kann ich dann mit herkömmlicher Rippenkühlung vergleichen." Sind die Experimente erfolgreich, muss die Auslegung der Kühlung berechnet und an Großstrukturen angepasst werden.

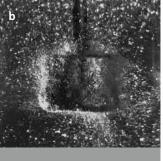
#### Forschung mit bildgebenden Messverfahren

Die Arbeit des Nachwuchswissenschaftlers wird von Doktorvater Uwe Hampel begleitet. Er ist Leiter der Experimentellen Thermofluiddynamik am HZDR und Inhaber der AREVA-Stiftungsprofessur für bildgebende Messverfahren für die Energieund Verfahrenstechnik an der TU Dresden. Ohne modernste Messtechnik, wie sie am HZDR vorhanden ist, wäre derartige Grundlagenforschung nicht möglich. Die Wissenschaftler nutzen ultraschnelle sowie hochauflösende Röntgentomographie, Hochgeschwindigkeits- und Infrarot-Kameras, 3-D-Scans und

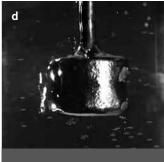
Beginnt eine Flüssigkeit zu sieden, entstehen Siedeblasen und die Flüssigkeit verdampft. Wird an der Heizfläche jedoch eine kritische Wärmestromdichte überschritten, bildet sich ein Dampffilm, der die Flüssigkeit von der Fläche isoliert und die Wärmeübertragung blockiert. Es entsteht eine Siedekrise. Jeder kennt den tanzenden Wassertropfen auf der heißen Herdplatte. Er schwebt oder gleitet auf einem Dampfpolster und es dauert eine ganze Weile, bis der Tropfen verdampft ist. Eine Siedekrise kann blitzschnell auftreten und ist im Kernreaktor bei laufendem Betrieb nicht mehr rückgängig zu machen. Aufgrund der isolierenden Dampfschicht nicht ausreichend gekühlt, erhitzen sich die Brennstäbe. Schlimmstenfalls kann es zur Beschädigung ganzer Brennelemente kommen.

SIEDEN: Wie verhält sich ein Kupferzylinder bei steigender Oberflächen-Temperatur? (a) Konvektiver Wärmeübergang ohne Blasen, (b) Blasensieden mit wenigen Blasen, (c) eruptives Blasensieden, (d) Filmsieden oberhalb des Leidenfrost-Punktes: Der Zylinder ist komplett von einem Dampffilm eingehüllt.









andere Messverfahren. Die Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die nukleare Sicherheit zu verbessern und industrielle Prozesse effizienter zu machen.

#### Wenn die Siedekrise zum Problem wird

Diesen Zielen widmen sich auch Debasish Sarker und Thomas Geißler, die ebenfalls bei Uwe Hampel promovieren. Beide beschäftigen sich seit Mitte 2014 mit Verdampfungsprozessen. Insbesondere untersuchen sie, wie Dampfblasen entstehen und sich in einer Strömung verhalten.

Sieden und Verdampfen sind wirkungsvolle Kühlmethoden. Im Kernkraftwerk werden sie genutzt, um die an den Brennelementen freigesetzte Wärme abzuführen. Der Dampf treibt eine Turbine an, der angeschlossene Generator wandelt die Bewegungsenergie in elektrische Energie um. Die Brennstäbe in den Brennelementen werden in einem Gitter auf Abstand gehalten. Für eine größtmögliche Energieausbeute muss dieser Abstand sehr klein sein, gleichzeitig aber eine gute Strömungsführung des Kühlwassers erlauben. Keinesfalls dürfen die Brennstäbe so heiß werden, dass eine Siedekrise eintritt.

#### Blick ins Innere

Die Siedekrise, der plötzliche Übergang vom Blasensieden zum Filmsieden, ist Gegenstand der Doktorarbeit von Thomas Geißler. Wann bildet sich der Dampffilm und wie hängt das mit der Strömung zusammen? Wie lässt sich die Siedekrise hinausschieben? Vieles ist noch ungeklärt. Um Antworten zu finden, hat der studierte Chemieingenieur ein Experiment aufgebaut. Unter einer Schutzhaube aus Aluminium befindet sich ein etwa 40 cm langes, dünnes Titanrohr. Wegen des niedrigeren Siedepunktes ist es statt mit Wasser mit einem Kältemittel gefüllt. Rundherum sind mehrere Goldspiegel angebracht. Wird das Rohr erhitzt, kann der junge Wissenschaftler zuschauen, wie die Flüssigkeit verdampft.

Für seine Beobachtungen nutzt er einen ultraschnellen Röntgentomographen und eine Infrarot-Kamera. Während der Tomograph ins Innere des Rohres "blickt", wird mit der Kamera über mehrere Spiegel das Temperaturfeld an der Außenseite gemessen. "Mit diesen Daten kann ich visualisieren, wie im Rohr Dampfblasen entstehen und deren Lebensweg verfolgen", erklärt er. "Manche wandern in der Strömung die Wand entlang, andere vereinigen sich zu größeren Blasen."



HAND IN HAND: Grundlagenexperiment, Simulation und Technologieentwicklung – die drei Doktoranden Debasish Sarker, Sebastian Unger und Thomas Geißler (v.l.n.r.) diskutieren vor der Dampftrommel der TOPFLOW-Anlage. Foto: Oliver Killig

Aus den Ergebnissen des Experiments leitet Thomas Geißler Modellvorstellungen ab. Die gibt es zwar schon, doch sind die Vorgänge so komplex, dass keine sie allumfassend beschreiben kann. Dann muss das Modell in mathematische Formeln gegossen werden, um es auf einen größeren Maßstab zu skalieren. Nur so lassen sich die komplexen Wärmeübertragungsprozesse an den Brennelementen unter allen denkbaren Konditionen modellieren. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden durch neue Experimente validiert. "Am HZDR habe ich die Möglichkeit, Forschung und technische Anwendung zu verknüpfen", freut sich der 27-Jährige.

#### Verdampfungsphänome besser verstehen

Debasish Sarker ist Master of Science für Maschineningenieurwesen und Energiesysteme. Nach seinem Studium in
Bangladesh und Südkorea kam er vor zweieinhalb Jahren ans
HZDR. Er untersucht einzelne Dampfblasen und bewegt sich
bei seinen Untersuchungen in der Größenordnung von weniger als einem Millimeter. An seinem Versuchsstand liefert ihm
eine Hochgeschwindigkeitskamera hoch auflösende Bilder der
Verdampfungsoberfläche und der Blasenbildung. Damit kann
der Doktorand beobachten, wie sich Dampfblasen entwickeln
und die Wand entlangrutschen sowie deren Strömungsgeschwindigkeit messen. Gleichzeitig simuliert er die Blasenbildung am Computer.

"Mit meiner Arbeit möchte ich dazu beitragen, das Verdampfungsphänomen besser zu verstehen", sagt der 33-Jährige. Besonders beschäftigt ihn die Frage, wie sich die Wärmeübertragung bei geringer Fließgeschwindigkeit in engen Geometrien, wie beispielsweise neuartigen Bündelwärmeübertragern, optimieren lässt. Grundlagenwissen, das für passive Kühlsysteme von gro-Ber Bedeutung ist. "Wenn wir hier Verbesserungen erreichen, dann hat das Auswirkungen auf die Energieeffizienz vieler großtechnischer Anlagen", ist er überzeugt.

An den Untersuchungen von Debasish Sarker sind auch seine beiden Kollegen interessiert. Für Sebastian Unger schaut er sich den Verdampfungsprozess

auf den beschichteten Proben an. Zu verstehen, was passiert, wenn eine Dampfblase wächst und sich ablöst, ist grundlegend für die Arbeiten von Thomas Geißler.

#### Mehr Sicherheit und Energieeffizienz

Auch wenn bis 2022 alle deutschen Kernreaktoren vom Netz gehen, sind Forschungen zur Reaktorsicherheit und zur sicheren Lagerung der Brennelemente weiterhin erforderlich. Nur mit eigener Fachkompetenz kann Deutschland auch in Zukunft auf Diskussionen um weltweite Sicherheitsstandards Einfluss nehmen und sich an internationalen Forschungsprojekten beteiligen. Die Projekte der drei Doktoranden von Uwe Hampel werden zum Teil aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft gefördert.

Doch sind ihre Forschungsergebnisse in vielen Bereichen anwendbar. Die Erkenntnisse zur Siedekrise sind überall dort von Bedeutung, wo viel Wärme auf kleinem Raum wegzukühlen ist, etwa bei bestimmten Computer-Bauteilen. Hydrophobe Beschichtungen hingegen könnten bei den erneuerbaren Energien einiges bewirken. Lassen sich damit niedrige Temperaturdifferenzen besser ausnutzen, kann das den Wirkungsgrad von Biogas-, Geothermie-, Solar- oder Wärmerückgewinnungsanlagen steigern.

#### \_ KONTAKT

\_Institut für Fluiddynamik am HZDR \_AREVA-Stiftungsprofessur für Bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik an der TU Dresden Prof. Uwe Hampel u.hampel@hzdr.de

Thomas Geißler und Sebastian Unger - beide TU Dresden; Debasish Sarker – Institut für Fluiddynamik am HZDR // Dank eines Georg Forster-Forschungsstipendiums verbringt George Mamatsashvili zwei Jahre am HZDR. Dadurch schlägt er nicht nur eine Brücke zwischen Georgien und Deutschland, sondern auch zwischen Astrophysik und Fluiddynamik.

### BINDEGLIED ZWISCHEN SIMULATION UND EXPERIMENT

TEXT . Simon Schmitt



George Mamatsashvili

"Astrophysiker beäugen unsere Experimente manchmal mit einer gewissen Skepsis", beschreibt Frank Stefani schmunzelnd seine Erfahrungen mit den Kollegen. Deshalb erfreut es den Dresdner Forscher umso mehr, dass er Anfang Dezember 2015 einen Experten dieses Feldes an seinem Institut für Fluiddynamik begrüßen konnte: George Mamatsashvili von der Universität in Tbilisi. Dank eines Georg Forster-Forschungsstipendiums der Alexander von Humboldt-Stiftung verbringt der Physiker zwei Jahre am HZDR – und holt in dieser Zeit die Sterne nach Rossendorf. Denn der gebürtige Georgier interessiert sich dafür, wie diese zu ihrer Masse kommen. Oder genauer gesagt: Er interessiert sich für die Magneto-Rotationsinstabilität (MRI).

Dieser magnetische Effekt spielt eine wichtige Rolle sowohl bei der Entstehung von Sternen und Planeten als auch bei der Bildung Schwarzer Löcher im Zentrum von Galaxien. "Die MRI beschreibt, wie Magnetfelder in eigentlich stabilen Strömungen Turbulenzen auslösen können", erklärt George Mamatsashvili. "Und genau dieses Phänomen ereignet sich auch im Universum." So rotieren um Schwarze Löcher und junge Sterne sogenannte Akkretionsscheiben – ringförmige

Scheiben aus Gas und Staub. "Weil der Drehimpuls gemäß der Keplerschen Bahngesetze nach außen hin anwächst, sind diese Scheiben an sich extrem stabil. Die Materieteilchen dürften sich deshalb gar nicht in Schwarzen Löchern oder Sternen sammeln."

#### Wie kommen junge Sterne zu ihrer Masse?

Erst wenn sie abgebremst werden, reicht die Fliehkraft nicht mehr aus, um sie auf den Kreisbahnen zu halten, erläutert Humboldt-Stipendiat Mamatsashvili: "Eben dies bewirkt die MRI. Sie destabilisiert die Scheibe und sorgt dadurch gleichzeitig dafür, dass Masse nach innen und der Drehimpuls nach außen getragen wird." Allerdings muss die Materie in den Scheiben dafür zumindest minimal elektrisch leitfähig sein. In toten Zonen oder am äußersten Rand ist dies nicht immer der Fall, weswegen die Wirkung der Standard-MRI, in der ein rein vertikales Magnetfeld angenommen wird, umstritten ist. Eine Lösung lieferte Frank Stefani gemeinsam mit Kollegen des HZDR und des Leibniz-Instituts für Astrophysik Potsdam im Jahr 2006, indem sie das senkrechte Magnetfeld der Standard-MRI um ein kreisförmiges ergänzten.

Dadurch konnten die Wissenschaftler schon bei geringen Magnetfeldstärken und Rotationsgeschwindigkeiten eine spezielle Variante des Phänomens, die helikale MRI, erstmals im Labor nachstellen. "Jedoch gibt es dabei einen Schönheitsfehler", gibt Stefani zu. "Die helikale MRI destabilisiert nur relativ steil nach außen abfallende Rotationsprofile, zu denen die Akkretionsscheiben zunächst einmal nicht gehören." Dieses Argument konnte der Dresdner Forscher vor etwa zwei Jahren mit einer erweiterten Theorie entkräften. Wie er mit seinen Kollegen gezeigt hat, kann die helikale MRI auch in diesen Fällen funktionieren – zumindest solange das kreisförmige Magnetfeld wenigstens zu einem kleinen Teil in der Scheibe selbst erzeugt wird, "was eine durchaus realistische Annahme ist."

#### Einzigartige Möglichkeiten

Es sind genau diese Theorien, aber vor allem die Experimente, die George Mamatsashvili nach Dresden lockten: "Außer dem HZDR gibt es weltweit vielleicht noch ein oder zwei andere Labore, die dieses Phänomen experimentell und nicht nur numerisch untersuchen." In seinem Forschungsaufenthalt

am Dresdner Zentrum sieht der osteuropäische Theoretiker deshalb eine einmalige Gelegenheit, um eine Brücke zwischen Astrophysik, die eher auf Simulationen setzt, und experimenteller Fluiddynamik zu schlagen. Dafür will er die MRI unter Voraussetzungen untersuchen, die die theoretischen Analysen bislang vernachlässigt haben. "Sie gehen von einem höheren Maß an Stabilität aus", erläutert Mamatsashvili. "Das entspricht jedoch nicht den tatsächlichen Bedingungen in den Scheiben, die wohl viel empfindlicher sind."

Für ihre Studien der MRI nutzten die meisten Forscher bislang in erster Linie den sogenannten modalen Ansatz: "Hier wird davon ausgegangen, dass Turbulenzen auf lange Sicht gesehen entweder exponentiell abfallen oder anwachsen. Dabei wird aber ihr Verhalten zu Beginn nicht beachtet. Dadurch werden von Anfang an auch solche Strömungen instabil, die auf lange Sicht eigentlich stabil sein müssten." George Mamatsashvili will deshalb für seine Simulationen den nicht-modalen Ansatz, der diesen Einfluss berücksichtigt, anwenden. "Verschiedene Studien haben gezeigt, dass das nicht-modale Wachstum der MRI viel stärker sein kann als das modale, und

damit die Bedingungen für die Entstehung der Turbulenzen gar nicht so stringent sein müssen, wie bisher angenommen."

Mithilfe des alternativen Ansatzes lässt sich der Einfluss der MRI auf die Prozesse in den Akkretionsscheiben genauer untersuchen, ist sich Mamatsashvili sicher. Dies will er zeigen, indem er seine theoretischen Ergebnisse an der Anlage PROMISE (Potsdam Rossendorf Magnetic InStability Experiment), an der auch Frank Stefani seine Untersuchungen durchgeführt hat, testet – und so schließlich die Verbindung zwischen Simulation und Experiment herstellt.

#### \_ KONTAKT

\_Institut für Fluiddynamik am HZDR Dr. George Mamatsashvili g.mamatsashvili@hzdr.de

Dr. Frank Stefani f.stefani@hzdr.de

→ www.humboldt-foundation.de

## HZDR-Forschungspreis für kontrollierte Spinwellen

Die Anzahl der Transistoren pro Mikroprozessor hat sich bisher etwa alle zwei Jahre verdoppelt. Die stetige Verkleinerung der Prozessoren bei steigender Leistung stößt jedoch an ihre Grenzen. Einer der Hauptgründe ist die Abwärme, die entsteht, wenn mehr Schaltkreise auf einer zunehmend kleinen Fläche zusammengepresst werden.

Die Nachwuchsgruppe *Magnonik* um Helmut Schultheiß verfolgt einen neuen Ansatz und setzt auf den Spin – den magnetischen Drehimpuls der Elektronen. Dieser ermöglicht, in ferromagnetischen Materialien Spinwellen auszulösen, die genauso wie fließende Ladungsträger Informationen transportieren können, jedoch ohne die extreme Abwärme.



Thomas Sebastian, Andreas Henschke, Helmut Schultheiß (2.-4. v.l.; nicht im Bild: Kai Wagner) erhielten den HZDR-Forschungspreis 2015 von IPP-Direktorin Sibylle Günter und HZDR-Vorstand Roland Sauerbrey. Foto: André Forner

Helmut Schultheiß, Andreas Henschke, Thomas Sebastian und Kai Wagner gelang es erstmals, die Ausbreitung einer Spinwelle auf der Nanoebene gezielt zu kontrollieren. Dafür haben sie die Welle in einer Domänenwand – dem Bereich, an dem unterschiedlich ausgerichtete Magnetisierungen aufeinandertreffen – entlang geleitet. Für diese Leistung erhielten sie den HZDR-Forschungspreis 2015.

#### Neue Helmholtz-Nachwuchsgruppe



Dominik Kraus

Vor kurzem konnte eine internationale Forschergruppe erstmals das Mineral Graphit in eine Diamantenform umwandeln, über die bisher nur spekuliert wurde: das Lonsdaleit. Unter natürlichen Bedingungen existiert diese

hexagonale Diamantenart auf der Erde nicht. Sie entsteht nur bei gewaltigen Drücken. Um das außerirdische Material nachzuweisen, haben die Forscher zwei Hochenergie-Laser mit dem Freie-Elektronen-Laser an der *Linear Coherent Light* 

Den Leiter der Gruppe, Dominik Kraus, zieht es nun ans HZDR. Denn ähnliche Experimente zur Warmen Dichten Materie (WDM) werden bald an der *Helmholtz International Beamline for Extreme Fields* (HIBEF) möglich sein. Ein Konsortium unter Leitung des HZDR stattet damit die Station für Experimente bei hohen Energiedichten am Röntgenlaser *European XFEL* aus. Um sich am Aufbau von HIBEF zu beteiligen, wechselte Kraus nach Dresden. Mit seiner Helmholtz-Nachwuchsgruppe will er die grundlegenden physikalischen Prinzipien der WDM erkunden.

// Unter der Leitung des Physikers Roman Böttger ist am ersten April ein neuer Ionenimplanter in Betrieb gegangen. Die Anlage steigert die Attraktivität des bei Wissenschaft und Industrie ohnehin gefragten lonenstrahlzentrums.

## JUNGE ANLAGE IN JUNGEN HÄNDEN

TEXT . Markus Fehrenbacher



RENNSTRECKEN: Inmitten der Strahlrohre, die vom Implanter zu insgesamt vier Experimentierstationen führen, steht der für die Anlage zuständige Physiker Roman Böttger. Foto: Oliver Killig

Es ist laut in dem kleinen, steril anmutenden Raum. So laut, dass man Roman Böttger kaum versteht, als er erklärt: "Das ist die Klimaanlage. Wenn nicht ständig die Luft ausgetauscht und getrocknet wird, kann es hier zu blitzartigen Entladungen kommen. Das müssen wir verhindern." Der Gruppenleiter "lonenimplantation" steht vor einem quaderförmigen Gebilde von der Größe eines Kleinwagens. Es ruht auf vier schwarzen Isolatoren in der Mitte des Raumes und ist der ganze Stolz des promovierten Physikers. War er doch maßgeblich beteiligt am

Aufbau des neuen Ionenimplanters. Mithilfe einer Spannung von 500 Kilovolt (kV) - das ist etwa das 2000-Fache von dem, was eine Steckdose liefert - werden hier lonen, also elektrisch geladene Atome, auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt. "Bei solch enormen Spannungen müssen besondere Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden", so Böttger.

Trotz seiner jungen Jahre blickt der 29-jährige Wissenschaftler auf eine beachtlich lange Zeit am Ionenstrahlzentrum zurück. Und das liegt keineswegs daran, dass er sich bei seiner Doktorarbeit besonders viel Zeit gelassen hätte - im Gegenteil. Bereits als Schüler legte der gebürtige Erzgebirgler den Grundstein für seine jetzige Tätigkeit: Eine erfolgreiche Teilnahme bei "Jugend forscht" im Jahr 2005 resultierte in einer Vielzahl von Auszeichnungen, von denen eine ein Praktikum am HZDR ermöglichte. Es folgte ein mustergültiges Physikstudium in Chemnitz mit regelmäßiger Tätigkeit am Ionenstrahlzentrum als studentische Hilfskraft, wo Roman Böttger schließlich mit überdurchschnittlichem Erfolg auch → seine Diplom- und Doktorarbeit anfertigte. So ist es wenig verwunderlich, dass er direkt nach der Promotion mit viel Verantwortung betraut wurde: Mit der Unterstützung von fünf technischen Mitarbeitern ist er seit nun knapp zwei Jahren in leitender Funktion für einen flüssigen Ablauf des Nutzerbetriebes zuständig. Und eben auch für die Inbetriebnahme der neuen Anlage.

#### Hohe Geschwindigkeiten bei großen Strömen

Das neue Gerät gliedert sich ein in eine ganze Reihe von Anlagen, die sowohl externen als auch internen Nutzern am Ionenstrahlzentrum zur Verfügung stehen. Sie alle erzeugen einen Strahl schneller Ionen, mit deren Hilfe sich Materialen verschiedenster Art gezielt manipulieren und untersuchen lassen. Als Faustregel gilt: je größer die erreichbare Geschwindigkeit der Teilchen bei einem Gerät, desto geringer die Anzahl der Teilchen, also der Teilchenstrom. Hierbei gibt es zwei Klassen von Anlagen. Auf der einen Seite hallenfüllende Beschleuniger, die zur Erzeugung besonders hoher kinetischer Energien notwendig sind. Diese werden hauptsächlich zu Analysezwecken eingesetzt, weil für die meisten Probleme der Materialbearbeitung die Ionenströme nicht ausreichen. Auf der anderen Seite Ionenimplanter, die eben im Gegensatz dazu dank der wesentlich größeren Ströme weitgehend zur Materialmodifikation genutzt werden. Sie sind wegen eines einfacheren Beschleunigungsprinzips deutlich kompakter - kompakt genug zumindest, dass der kleine Raum mit der tosenden Klimaanlage dem Neuzugang genügend Platz bietet.

Der 500-kV-Implanter liefert nun, anders als die schon vorhandenen 40-kV- und 200-kV-Ausführungen, eine Kombination besonders hoher Geschwindigkeiten und Ionenströme. Die moderne Anlage löst damit einen in die Jahre gekommenen 500-kV-Vorgänger ab. "Das neue Gerät hat eine Menge Vorteile", erläutert Roman Böttger. "Es ist rundum computergesteuert. Während man an der alten Maschine zwei Stunden lang mit vielen Potentiometern alles manuell einstellen musste, um den Ionenstrahl zu justieren, reichen heute 15 Minuten. Außerdem ist es modular aufgebaut und damit sehr wartungsfreundlich." Alles in allem also eine immense Zeitersparnis, von der natürlich der Nutzerbetrieb profitiert. "Ein weiterer wichtiger Fortschritt ist, dass manche Ionensorten nun sehr viel größere Ströme erlauben. Dadurch werden bestimmte Hochdosis-Experimente erst jetzt möglich."

#### Nutzung durch Wissenschaft und Industrie

Verlässt man den kleinen Raum durch die Sicherheitstür, bemerkt man ein massives Stahlrohr, das die beschleunigten lonen in eine große Halle leitet. Tentakelartig verzweigt es sich in vier kleinere Rohre, in denen die geladenen Atome wiederum zu verschiedenen Aufbauten rasen. Dort treffen sie dann auf Materialen der Wahl. "Jeder Aufbau ist für eine bestimmte Herangehensweise konzipiert und optimiert", sagt Böttger und deutet auf eine der vier Stationen. "Dieser wird zum Beispiel vor allem im Auftrag industrieller Unternehmen betrieben, um dort Wafer – also dünne Halbleiter-

scheiben – zu bearbeiten." Der Wissenschaftler spricht damit einen wesentlichen Punkt an, nämlich den gemeinhin starken Anwendungsbezug der Materialforschung mit Ionen. Das zeigt sich nicht zuletzt an der Vielzahl von Produktinnovationen, die am Ionenstrahlzentrum in den vergangenen Jahren realisiert wurden. Seit 2011 nutzt die HZDR Innovation GmbH, eine überaus erfolgreiche Ausgründung des HZDR, regelmäßig den Ionenstrahl-Service an den hiesigen Anlagen, um für internationale Firmen nur hier realisierbare Prozessschritte umzusetzen. Dieser Ionenstrahl-Service wiederum ermöglicht dem Ionenstrahlzentrum auch größere Investitionen wie etwa den neuen Implanter, der auf diese Weise vollständig finanziert werden konnte. "Das ist bei Helmholtz-Zentren bislang einzigartig", unterstreicht Böttger.

Den größten Teil des Nutzerbetriebes, etwa 80 Prozent, machen allerdings wissenschaftliche Experimente aus. "Ganz klar, Wissenschaft hat Priorität." Der hohe Stellenwert des lonenstrahlzentrums für die Forschung ist dabei vor allem der Fülle an verschiedenen lonensorten zu verdanken. Während viele lonenanlagen auf wenige lonenspezies, im Allgemeinen zur Halbleiterprozessierung, spezialisiert sind, können hier alle nichtradioaktiven Elemente beschleunigt werden. "Wir können das ganze Periodensystem", sagt Böttger und fügt augenzwinkernd hinzu: "Viele Einrichtungen haben gerade mal eine Bor-Maschine." Bor wird als häufigstes Dotierelement in der Halbleiterindustrie genutzt.

#### Viele Möglichkeiten für unterschiedlichste Nutzer

Wenn man Roman Böttger nach den Anwendungsmöglichkeiten der Ionenimplantation fragt, ist er in seinem Element. "In der Halbleiterindustrie ist sie ein absolut elementares Werkzeug. Ob Handy oder Kamera, nichts würde so funktionieren wie wir es kennen. Selbst in Bereichen wie Medizin oder Weltraumforschung wird die Technik eingesetzt, sei es zur Herstellung antibakterieller Oberflächen oder zur Simulation von Sonnenwind."

Ideen für neue Experimente hätte er genug – die Zeit, diese selbst durchzuführen, hingegen nicht. Ob er das nicht schade finde? "Damit kann ich gut leben. Was mir an meiner Arbeit besonders Spaß macht, ist die große Breite an wissenschaftlichen Themen, mit denen ich mich intensiv beschäftigen darf. Die Experimente, die hier gemacht werden, sind sehr unterschiedlich und individuell." Allein letztes Jahr landeten knapp 100 Anträge für lonen-Experimente auf Roman Böttgers Schreibtisch. In diesem Jahr wird es wohl nicht weniger Anfragen geben. Gerade was den neuen 500-kV-Implanter angeht, stehen die Nutzer bereits Schlange.

#### \_ KONTAKT

\_Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung am HZDR **Dr. Roman Böttger** r.boettger@hzdr.de

## WISSENSWERT - NACHRICHTEN RUND UM DAS HZDR

#### 60 Jahre Radiopharmazie in Dresden

Vor 60 Jahren, also kurz nach der Gründung des Forschungsstandortes Rossendorf am 1. Januar 1956, wurde damit begonnen, radioaktive Substanzen für Medizin und Wirtschaft nutzbar zu machen. Damals gab es keine strikte Trennung zwischen Radiochemie und Radiopharmazie, im Mittelpunkt standen vielmehr Fragen der Erzeugung von Radionukliden am Forschungsreaktor, deren Abtrennung, Reinigung und Handhabung.

Auch die heutige Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin am Uniklinikum Dresden blickt auf eine 60-jährige Geschichte zurück. Die medizinische Nutzung von Radionukliden begann allerdings schon im Jahr 1939 mit ersten Anwendungen von Iod-131. Heute werden in der deutschen Nuklearmedizin jährlich rund 60.000 Therapien und über zwei Millionen diagnostische Untersuchungen durchgeführt.



Kunst am neuen Zentrum für Radiopharmazeutische Tumorforschung – das Werk "Strahlen" des Künstlers Karl-Heinz Adler wurde am 28. Mai durch die Sächsische Staatsministerin für Wissenschaft und Kunst, Dr. Eva-Maria Stange, feierlich enthüllt.

Am Rossendorfer Zentralinstitut für Kernforschung (ZfK) entwickelte sich unter Kurt Schwabe, Direktor des Bereichs Radiochemie von 1959 bis 1969, die sogenannte Isotopenproduktion, also die kommerzielle Herstellung von Radiopharmaka. Unter der Leitung seines Nachfolgers Rudolf Münze wurde die Produktion wissenschaftlich untersetzt, modernisiert und enorm ausgeweitet. Dies betraf vor allem die Herstellung von Spaltmolybdän in Verbindung mit der Herstellung von Molybdän-99/Technetium-99m-Generatoren (Rossendorf

war damit weltweit der zweite Hersteller von Spaltmolybdän). Gleichzeitig arbeiteten die ZfK-Forscher an neuen Substanzen und daran, diese auf hohem qualitativen Niveau herzustellen. Der damals in Mittel- und Osteuropa gebräuchliche Begriff "Rossendorfer Standard" markiert diese Entwicklung hin zu einer leitenden Einrichtung auf dem Gebiet der Radiopharmazie. Das "Therapie-lod" etwa wurde in Ost- wie in Westeuropa vertrieben.

Nach der Neugründung des Forschungszentrums Rossendorf zum 1.1.1992 übernahm Bernd Johannsen die Leitung des radiopharmazeutischen Instituts. Er richtete es verstärkt auf den biochemisch-medizinischen Hintergrund der Radiopharmazie und auf eine angewandte Grundlagenforschung aus. Durch eine engere akademische Anbindung an die TU Dresden engagierte sich das Institut verstärkt in Lehre und Doktorandenausbildung. Im Jahr 1995 ging ein Zyklotron in Betrieb, das dazu dient, die radioaktiven Ausgangsstoffe für die Diagnose von Krebserkrankungen mithilfe der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) herzustellen. Eine Ganzkörper-PET-Kamera folgte im Jahr 1997, in dem auch die feierliche Einweihung des PET-Zentrums Rossendorf stattfand. In diesem arbeiten die Partner HZDR, Universitätsklinikum und TU Dresden auch heute noch eng zum Wohle der Krebspatienten zusammen. Bis zum Umzug der PET-Kamera im Jahr 2015 an das Universitätsklinikum fand 20 Jahre lang der Patientenbetrieb in Rossendorf statt, rund 17.000 Untersuchungen wurden hier durchgeführt.

#### Den Krebs mit Strahlung bekämpfen

Um die Heilungsraten bei Krebserkrankungen weiter zu erhöhen, bedarf es vielerlei neuer Ansätze. Das heutige Institut für Radiopharmazeutische Krebsforschung setzt auf die Verbindung von Bildgebung einerseits und Endoradionuklid-Therapie andererseits. Bei dieser soll das Radiotherapeutikum im Körperinneren die Krebszellen direkt im Tumor oder in den Metastasen abtöten. Um hier erfolgreich sein zu können, ist eine enge Kooperation mit den medizinischen Partnern im Rahmen des NCT Dresden (NCT = Nationales Centrum für Tumorerkrankungen) unabdingbar.

Dem HZDR-Institut jedenfalls kommen das jahrzehntelange Know-how rund um radioaktive Substanzen und die biochemischen Kompetenzen zugute – allerdings ist es immer noch ein weiter Weg bis zum Einsatz am Patienten. Auch auf die Immuntherapie setzen Onkologen und Patienten weltweit derzeit große Hoffnungen. Neuartige Immuntherapeutika zusätzlich mit radioaktiven Strahlern auszustatten, daran wird ebenfalls am HZDR unter der Leitung von Jörg Steinbach und Michael Bachmann gearbeitet.

#### Röntgen-Plakette für Michael Baumann



Wissenschaft auf höchstem Niveau und zum Wohle krebskranker Patienten, das ist für den Direktor gleich mehrerer Dresdner Einrichtungen Verpflichtung und Selbstverständnis zugleich. Der Strahlenbiologe und Strahlentherapeut Michael Baumann leitet das OncoRay-Zentrum, die Strahlentherapie-Klink am Uniklinikum Dresden, das Institut für Radioonkologie

am HZDR und den NCT-Partnerstandort Dresden. Am 23. April wurde er in Remscheid, der Geburtsstadt Wilhelm Conrad Röntgens, für seine herausragenden wissenschaftlichen Leistungen mit der Röntgen-Plakette ausgezeichnet. Diese wird vom Oberbürgermeister an Persönlichkeiten verliehen, die sich um den Fortschritt und die Verbreitung der Röntgen zu verdankenden Entdeckung besonders verdient gemacht haben.

#### EMFL wird "Wahrzeichen"

Das Europäische Strategieforum für Forschungsinfrastrukturen (ESFRI) hat das European Magnetic Field Laboratory (EMFL) als "Landmark" in seiner neuen Roadmap aufgenommen. Das EMFL wird damit als eine von 29 Einrichtungen gewürdigt, die europäischen Wissenschaftlern einzigartige Spitzenforschung ermöglichen und so langfristig die Forschung in Europa stärken. Das EMFL vereint drei europäische Hochfeld-Magnetlabore an den vier Standorten Dresden, Grenoble, Toulouse und Nijmegen und stellt die höchsten gepulsten und statischen Felder Europas für interne wie auch externe Nutzer bereit. Solche hohen Magnetfelder zählen zu den mächtigsten Werkzeugen, um Materialeigenschaften gezielt zu verändern und zu untersuchen.

#### Gold für HZDR-Film

Auf dem World Media Festival in Hamburg wurden am 11. Mai wichtige Filmpreise der PR-Branche verliehen. Mit dabei war das HZDR, das einen "Intermedia-Globe" in Gold in der Kategorie "Forschung und Wissenschaft" für seinen Film über Endlagerforschung erhalten hat. Darüber freute sich auch der zuständige Institutsdirektor Thorsten Stumpf: "Unser Institut für Ressourcenökologie betreibt grundlegende Forschungen zu Fragen der Endlagerung hochradioaktiven Abfalls. Wir wollten diese gesellschaftlich wichtige Aufgabe allen Interessierten näher bringen, und dafür ist das Medium Film natürlich besonders gut geeignet." Der HZDR-Film räumte gleich noch einen weiteren goldenen Preis ab: Er wurde auf dem 49. Internationalen Filmfest im texanischen Houston mit dem Remi Award in Gold in der Kategorie "Nuklearthemen / Energie" ausgezeichnet. Produziert hat ihn die Dresdner Firma Avanga.

#### **Terminvorschau**

#### 17.06.2016

Einweihung des neuen Forschungsstandorts für das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie am HZDR Chemnitzer Straße 40 | Freiberg

#### 24.06.2016

Lange Nacht der Wissenschaften in Leipzig

#### 29.06.2016

Markus Reuter, Direktor am Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie des HZDR, als Experte in der econsense Tec-Arena:

"Nutzung statt Entsorgung – Die Circular Economy als Schüssel für nachhaltiges Wirtschaften?" Berlin | Akademie der Konrad-Adenauer-Stiftung

#### Wissenschaftliche Veranstaltungen

BIO-INSPIRED FUNCTIONAL MATERIALS – SUMMERTALKS 2016 Helmholtz Virtual Institute NanoTracking

#### 12.07.2016

Metallic nanoparticles in proteomics as scavengers for biomarker discovery

Prof. Carlos Lodeiro Espiño | Departamento de Química | Universidade Nova de Lisboa

#### 14.07.2016

Dye doped silica nanoparticles as luminescent organized systems for nanomedicine Prof. Luca Prodi | Dipartimento di Chimica | Università di Bologna

#### 21.07.2016

Fluorescent organic nanoparticles as bright labels for bio-imaging and cell tracking Prof. Eléna Ishow | Département Chimie | Université de Nantes

#### 10.-15.07.2016

Biometals 2016 – 10<sup>th</sup> International Biometals Symposium art'otel Dresden | HZDR-Institut für Ressourcenökologie

#### 10.-12.10.2016

SATIF-13 – 13<sup>th</sup> Meeting of the Task-Force on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities HZDR | Institut für Strahlenphysik

#### Petrus Peregrinus-Medaille 2016

Dass die Erde ein Magnetfeld hat, ist seit langer Zeit bekannt. Der grundlegende Mechanismus seiner Entstehung wurde aber erst vor kurzem im Laborexperiment bestätigt. Für die weltweit erste Demonstration dieses Dynamo-Effekts steht der Name Agris Gailitis. Seit den 1960er Jahren hatte sich der Professor am Institut für Physik der Lettischen Universität in Riga mit magnetischer Selbsterregung beschäftigt. Am 11.11.1999 war es dann soweit: Gemeinsam mit Wissenschaftlern aus dem HZDR konnte die Selbsterregung eines Magnetfeldes in einer spiralförmigen Strömung flüssigen Natriums nachgewiesen werden. Wie es der Zufall wollte, "zündete" nur wenige Tage danach auch der Dynamo am damaligen Forschungszentrum Karlsruhe.

Für diesen Meilenstein der Magnetohydrodynamik, der zugleich wichtige Grundlagen für die aktuellen Experimente in Cadarache, Maryland, Grenoble, Madison, Zürich und Dresden-Rossendorf gelegt hat, wurde Agris Gailitis nun ausgezeichnet. Er erhielt am 18. April 2016 die Petrus Peregrinus-Medaille 2016. Damit würdigt die European Geosciences Union (EGU) herausragende wissenschaftliche Beiträge auf dem Gebiet des Magnetismus und des Paläomagnetismus. Peregrinus war ein französischer Gelehrter, der im 13. Jahrhundert in seiner Abhandlung "Epistola de Magnete" als erster die Polarität von Magneten beschrieb.



HZDR-Physiker Frank Stefani (re.) hatte Agris Gailitis (Mitte) als Preisträger nominiert. Foto: EGU/Pfluegl

#### Lehrerfortbildung lockt viele Teilnehmer

Über die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse aus der Astrophysik informierten sich bei der jährlichen Lehrerfortbildung Mitte Februar rund 130 Pädagogen aus ganz Sachsen. Dank verschiedener Vorträge – beispielweise zur Entstehung und Wirkung kosmischer Magnetfelder – sowie Führungen durch ausgewählte Labore frischten die Teilnehmer ihren Wissensstand auf. Dabei konnten sie sich gleich mit Informationen zu einem brandaktuellen Thema versorgen: dem erstmaligen Nachweis von Gravitationswellen.

So widmete der Physikdidaktiker Karl-Heinz Lotze von der Friedrich-Schiller-Universität Jena kurzfristig seinen Eröffnungsvortrag dieser Entdeckung, die der LIGO-Kollaboration Anfang Februar gelungen war. Das HZDR bietet seit vielen Jahren Lehrerfortbildungen an, Pädagogen können aber auch weitere Angebote des Schülerlabors DeltaX wahrnehmen.

#### DeltaX begrüßt den 10.000sten Schüler

Der 26. April war für Matthias Streller und sein Team im HZDR-eigenen Schülerlabor DeltaX ein ganz besonderer Tag, galt es doch, den 10.000sten Jungforscher zu feiern. Der Glückskandidat hieß Aaron Ickert. Er und seine Mitschüler vom Werner-Heisenberg-Gymnasium Riesa sowie ein weiterer Leistungskurs des Julius-Ambrosius-Hülße-Gymnasiums Dresden führten am Jubiläumstag Versuche zu magnetischen Phänomenen durch. Dass gleich zwei Klassen an einem Tag das HZDR besuchten, ist ein Beleg für die große Nachfrage. Selbstständig forschungsnahe Experimente in einem großen Helmholtz-Zentrum durchzuführen – das kommt eben gut an bei den Jugendlichen.



Aaron Ickert aus Riesa und das DeltaX-Team: Matthias Streller, Florian Simon, Nadja Gneist (v.l.)

Detektor im Neutronenlabor - s. Artikel S. 26-27

Foto: Oliver Killig

#### **IMPRESSUM**

#### HERAUSGEBER

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

#### **ERSCHEINUNGSDATUM**

Juni 2016

ISSN: 2194-5705 // Ausgabe 01.2016

#### REDAKTION

Dr. Christine Bohnet (verantwortlich), Simon Schmitt, Jana Grämer (Bilder) |

Kommunikation und Medien am HZDR

Wissenschaftlicher Redaktionsbeirat (nach Forschungsbereichen):

Energie – Dr. Harald Foerstendorf, 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 | Kommunikation und Medien, HZDR

Dr. Markus Fehrenbacher | Praktikum@Kommunikation und Medien, HZDR Inge Gerdes | Freie Journalistin, Dresden

Frank Grotelüschen | Freier Wissenschaftsjournalist, Hamburg

Sascha Karberg | Journalistenbüro Schnittstelle, Berlin

Sara Schmiedel | Freie Wissenschaftsjournalistin, Leipzig

Tina Schulz | Kommunikation Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, HZDR

#### BILDNACHWEIS

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des HZDR, soweit nicht anders angegeben

#### **GESTALTUNG**

WERKSTATT X . Michael Voigt

www.werkstatt-x.de

#### **DRUCK**

Druckerei Mißbach

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

#### NACHDRUCK

mit Quellenangabe gestattet. Belegexemplar erbeten.

"entdeckt" erscheint zweimal jährlich, unter dem Titel "discovered" auch auf Englisch. Alle Print-Ausgaben finden Sie als E-Paper auf den Internetseiten des HZDR.

#### → www.hzdr.de

Das HZDR auf Facebook und Twitter.

→ www.facebook.com/Helmholtz.Dresden

→ www.twitter.com/hzdr\_dresden

WWW.HZDR.DE

## **SPURENMETALLE**

## für die Wirtschaft

HIGHTECH-METALLE • die Energiewende ermöglichen

ROHSTOFFE • das heimische Potenzial erkunden

NACHWUCHS • eine neue Experten-Generation ausbilden

Diese winzige Gesteinsprobe besteht aus kugelförmigen Kristallen aus Kupferarsenit auf einem Fluoritwürfel. Wie genau die Minerale miteinander verwachsen sind, zeigt die Rasterelektronen-Mikroskopie.

HIF-Wissenschaftler nutzen die mit dieser Methode gewonnenen Informationen, um mechanische Aufbereitungsverfahren von mineralischen oder metallischen Rohstoffen zu verbessern.

