



## Die Jagd nach den Rohstoffen

### Wenn Magnete die Frustration packt

HZDR-Physiker erkunden seltsame Quantenphänomene

### Deutschlands verborgene Schätze

Auf der Spur einheimischer Ressourcen

### Farben scheiden die Geschlechter

Neue Erkenntnisse über die Wahrnehmung

**HZDR**

 **HELMHOLTZ**  
ZENTRUM DRESDEN  
ROSSENDORF

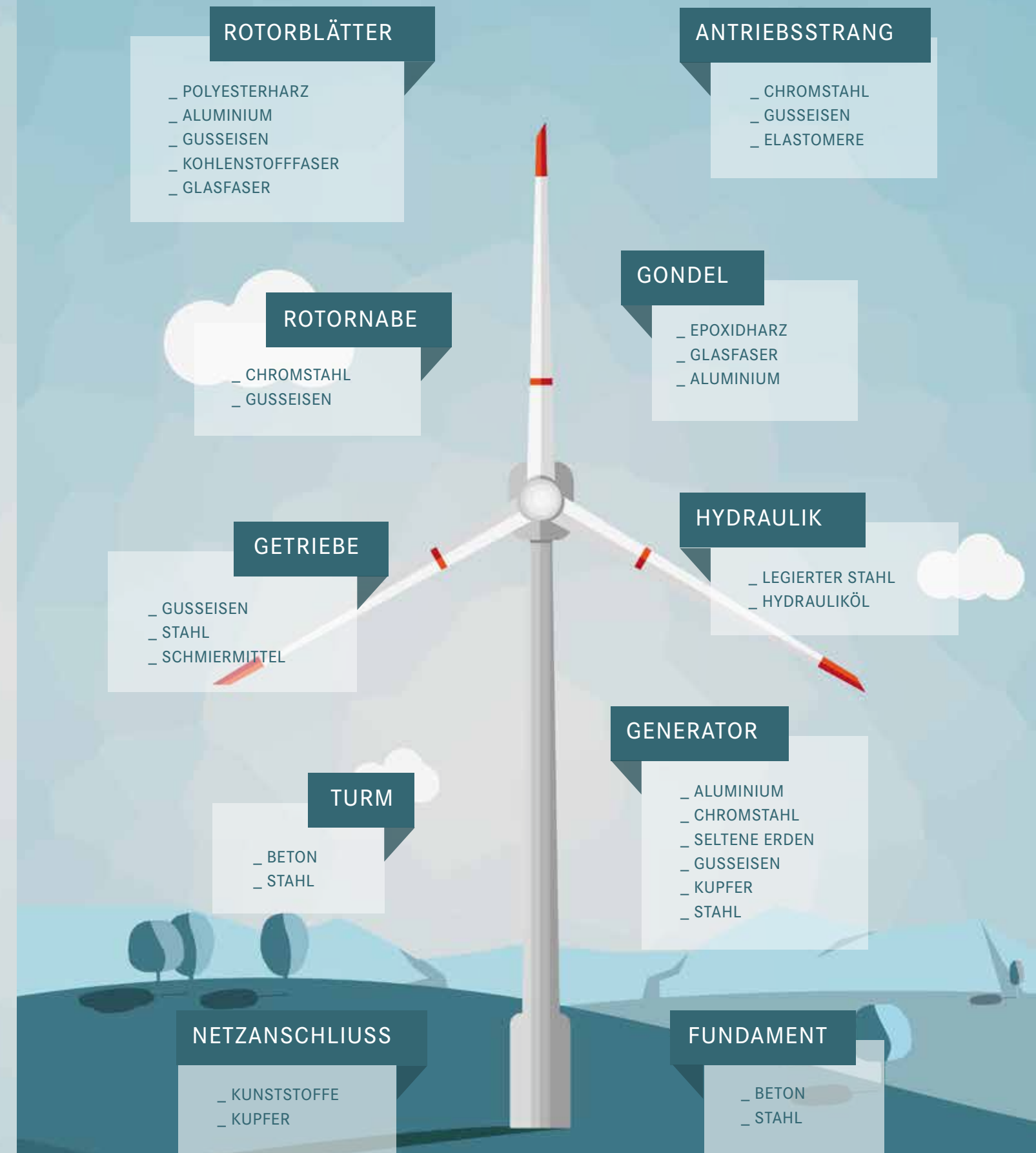
# Was kostet der Wind?

Wir sind von Rohstoffen abhängig: In unserem Alltag sorgt eine Vielzahl unterschiedlichster Metalle – versteckt in unseren Smartphones oder Computern – zum Beispiel dafür, dass wir die Annehmlichkeiten moderner Kommunikationsmöglichkeiten genießen können. Aber auch gesamtgesellschaftlich lässt sich die Relevanz der Ressourcen kaum unterschätzen. Der langfristige Umstieg von fossilen und nuklearen Energieträgern auf erneuerbare lässt den Bedarf an Basismetallen wie Eisen, Kupfer und Aluminium in die Höhe schnellen. So stecken in einer typischen Windkraftanlage mehr als 200 Tonnen Metalle. Wie Experten französischer Universitäten ausgerechnet haben, sind 1,15 Tonnen Kupfer, drei Tonnen Aluminium und 130 Tonnen Eisenmetalle nötig, um ein Megawatt Strom aus Windkraft zu gewinnen. Hinzu kommen viele Seltene Erden, wie Neodym oder Molybdän.

Weil sich die Rohstoffe lange billig aus dem Ausland einführen ließen, hat sich die deutsche Industrie in den letzten 20 Jahren stark auf den Import der

benötigten Ressourcen verlassen. Steigende Preise oder Verknappungen auf den internationalen Märkten haben allerdings die damit einhergehende Abhängigkeit aufgezeigt, die im schlimmsten Fall ganze Produktionen zum Erliegen bringen kann. Die Lösung könnte teilweise in deutschen Böden stecken. Denn diese sind wohl nicht wirklich rohstoffarm, wie ein gängiger Mythos behauptet, sondern eher unterexploriert. Forscher am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf entwickeln deswegen neue Methoden, um umweltschonend die verborgenen Schätze aufzuspüren. Aber auch bei gängigen Aufbereitungsverfahren und dem Recycling sehen die Wissenschaftler viel Potential zur Verbesserung. Gerade die Wiedergewinnung der Ressourcen dürfte in Zukunft eine immer stärkere Rolle spielen.

So könnten Windkraftanlagen nicht nur die Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen ermöglichen, sondern – am Ende ihres Lebens – sogar die Grundlage für die nächste Generation der Anlagen liefern.





Quelle: A. Wirsig

## Liebe Leserinnen und Leser,

in meiner Schreibtischschublade schlummern Reichtümer: vier abgelegte Handys, zwei ausrangierte Laptops und eine veraltete Digitalkamera – oder, wenn man die Geräte in ihre einzelnen Teile zerlegt, Gold, Silber sowie weitere Metalle und Seltene Erden. Wenn man bedenkt, dass es in zahlreichen deutschen Schubladen ähnlich aussieht, ergibt sich eine Masse an Rohstoffen, mit der sich gut etwas anfangen ließe. So landet, nach Einschätzungen von Entsorgungsexperten, zum Beispiel mehr Kupfer in Deutschland im Müll als die größte chilenische Kupfermine pro Jahr produziert.

Das Problem: Da wertvolle oder „exotische“ Metalle, wie Palladium oder Tantal, lediglich in extrem kleinen Mengen in die Geräte verbaut werden, ist ihre Wiedergewinnung äußerst kompliziert. Um das zu ändern, müssten die Hersteller in ihre Planungen bereits am Anfang der Produktionskette das Lebensende ihres Geräts miteinbeziehen. Wissenschaftler an unserem Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie entwickeln ebensolche Strategien, die eine Kreislaufwirtschaft ermöglichen könnten. Aber nicht nur das Recycling, sondern auch umweltschonende Exploration und effiziente Aufbereitung der Rohstoffe beschäftigen unsere Forscher.

Gleichzeitig arbeiten Ingenieure an kostengünstigen und zuverlässigen Technologien, um den Strom aus fluktuierenden Quellen, wie Sonne oder Wind, zu speichern. Den gewaltigen Energiehunger von modernen Elektrogeräten zu drosseln, haben sich wiederum Physiker zum Ziel gesetzt. Diese und ähnliche fächerübergreifende Forschung zu drängenden Energiefragen unserer Zeit möchten wir Ihnen in der neuesten Ausgabe unseres Magazins „entdeckt“ vorstellen.

Auf Ihre Fragen, Kommentare und Anregungen freue ich mich und wünsche Ihnen viel Spaß bei der Lektüre.

Simon Schmitt  
Chefredakteur

# Inhalt



## Porträt

### 34 Ganz unten im Periodensystem

Kristina Kvashnina hat vom Europäischen Forschungsrat einen der begehrten ERC-Starting Grants erhalten. „entdeckt“ hat sich mit ihr unterhalten.



## Forschung

### 29 Wenn Magnete die Frustration packt

Am Hochfeld-Magnetlabor Dresden untersuchen Physiker ungewöhnliche Materialien mit extremen Hilfsmitteln. Sie kommen dadurch merkwürdigen Quantenphänomenen auf die Spur.

### 32 Farben scheiden die Geschlechter

Verarbeiten Frauen und Männer Farben in den gleichen Gehirnhälften? Eine interessante Antwort – für Mäuse wie für Menschen – kommt aus Nigeria und Leipzig.



## Titel

## Die Jagd nach den Rohstoffen

### 08 Deutschlands verborgene Schätze

Die Energiewende lässt die Nachfrage nach metallischen Rohstoffen in Deutschland steigen. Viele Ressourcen werden importiert, obwohl das einheimische Potential noch nicht ausgereizt ist. Nun beginnt die Suche – per Hubschrauber und Drohne.

### 14 Ein Schaumbad für die Erze

Flotation wird seit vielen Jahrzehnten eingesetzt, um wertvolle Erze aus taubem Gestein zu lösen. Trotzdem ist die Methode immer noch nicht komplett optimiert. Die zugrundeliegenden Vorgänge sind schlicht zu komplex. Spezielle Mikroskope, Ultraschall und Simulationen bringen Licht in den trüben Prozess.

### 20 Wenn der Wind nicht weht

Flüssigmetall-Batterien könnten ein preiswertes und effizientes Mittel sein, um den schwankenden Stromfluss aus regenerativen Quellen zu speichern. Wir zeigen, wie sie funktionieren.

### 22 Energiediät für Mikrochips

Wie lässt sich der rasant steigende Energieverbrauch elektronischer Geräte dämpfen? Mögliche Lösungen könnten in extrem sparsamen Speicherchips und der Abwärme liegen.

### 26 Erneut in die Fabrik statt auf den Abfall

In alten Elektrogeräten stecken viele Rohstoffe, die wiederverwertet werden könnten. Zu oft landen sie derzeit jedoch im Abfall. Das Beispiel Fairphone-2 zeigt, wie sich das ändern ließe.



**Titelbild:** In vielen elektronischen Gegenständen unseres Alltags verbergen sich zahlreiche Rohstoffe. Wie sich diese Ressourcen am Lebensende der Geräte zurückgewinnen lassen, um sie erneut einzusetzen, erforschen Wissenschaftler am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.  
Quelle: Juniks

## Rubriken

- 02 Warum wir forschen
- 04 Editorial
- 06 Woran wir forschen
- 36 Nachrichten aus dem HZDR
- 37 Terminvorschau
- 38 Impressum
- 39 Die Welt von Morgen

# Highlights aus unserer Forschung

## RADIOONKOLOGIE

### So weit die Protonen fliegen

Um einen Tumor möglichst exakt mit Protonen zu treffen, müssen Mediziner wissen, wie weit die Strahlen in den Körper eindringen. OncoRay-Wissenschaftler konnten nun mit Kollegen vom Deutschen Krebsforschungszentrum ein neues Berechnungsverfahren entwickeln und umfangreich validieren, mit dem sich die Reichweite wesentlich genauer bestimmen lässt. Die neue Methode basiert auf der Dual-Energy-Computertomographie (DECT), die jeweils zwei CT-Aufnahmen mit unterschiedlichen Röntgenenergien erzeugt. Mit Hilfe ihres neuen Algorithmus konnten die Wissenschaftler über die Auswertung von DECT-Aufnahmen bei 50 Patienten mit Hirn-

oder Prostata Tumoren zeigen, dass beim bisher eingesetzten Verfahren klinisch relevante Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlicher Reichweite auftreten. Die Dresdner Protonentherapie ist damit die weltweit erste Institution, die die Information aus der DECT-Berechnung nutzt, um die Standardmethode zu präzisieren. 2018 wollen die Forscher komplett auf die DECT-basierte Berechnung umsteigen.

#### Publikation:

P. Wohlfahrt et al., in Radiotherapy and Oncology, 2017 (DOI: 10.1016/j.radonc.2017.09.042)

## ATOMPHYSIK

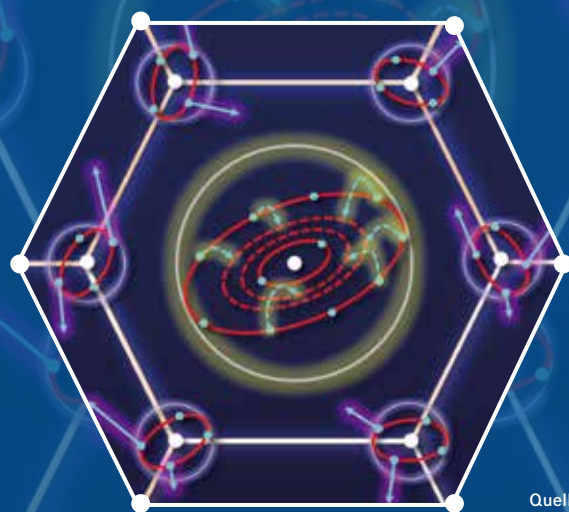
### Hohl, aber reich an Energie

Forscher der TU Wien und des HZDR konnten aufzeigen, warum die hoch angeregten Elektronen sogenannter „hohler Atome“ schon bei ultrakurzem Kontakt (Femtosekunden) mit Festkörpern fast ihre komplette Energie abgeben. Der Grund dafür liegt bei einem bislang kaum beachteten Effekt – dem interatomaren Coulomb-Zerfall. Dabei überträgt ein einzelnes Elektron seine Energie auf mehrere andere Elektronen benachbarter Atome. Bei ihren Versuchen ließen die Physiker ein Xenon-Atom durch eine Graphen-Schicht fliegen. Dabei kam es mit mehreren Kohlenstoff-Atomen in

Kontakt. Weil dadurch ein Elektron aus dem Xenon seine hohe Energie abgab, haben gleich mehrere Elektronen im Graphen ihren angestammten Platz verlassen und sind davon geflogen – allerdings jedes nur mit relativ geringer Energie.

#### Publikation:

R.A. Wilhelm et al., in Physical Review Letters, 2017 (DOI: PhysRevLett.119.103401)



Quelle: TU Wien

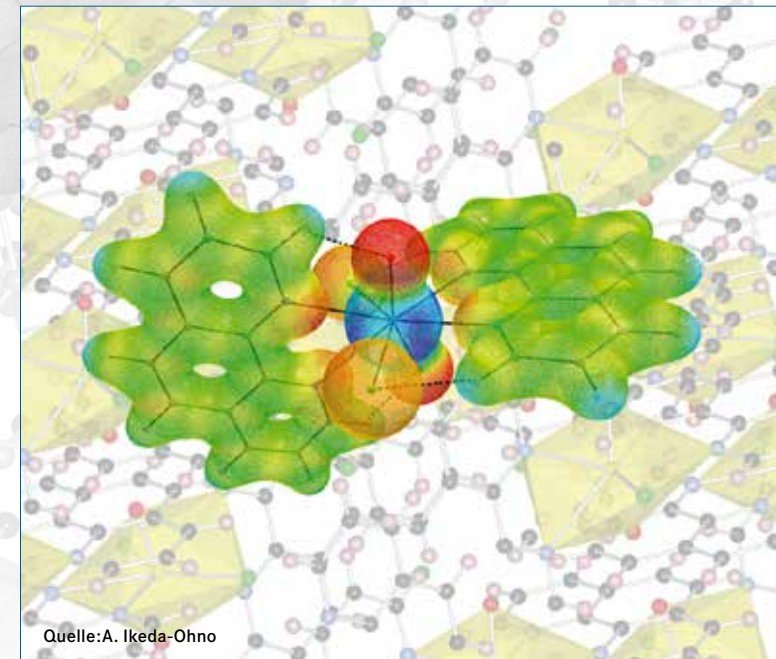
## RESSOURCENÖKOLOGIE

### Gebogen, nicht gerade

Dresdner Radiochemikern am HZDR ist es gelungen, eine Uranylverbindung herzustellen, die eine einmalige geometrische Grundstruktur aufweist. Normalerweise binden sich in solchen Komplexen zwei Sauerstoff- an ein Uran-Atom und bilden auf diese Weise eine lineare, sehr stabile Einheit mit einem 180-Grad-Winkel. In der neuen Substanz verbiegt sie sich jedoch deutlich zu 161,8 Grad – einer der bislang kleinsten nachgewiesenen Winkel für diese Einheit. Gleichzeitig binden sich zwei stickstoffhaltige Moleküle sowie zwei Chlor-Atome so an die Einheit, dass sich ein Koordinationspolyeder aus zwölf gleichschenkligen Dreiecken (Trigondodekaeder) bildet. Durch diese ungewöhnliche Struktur kann die Fähigkeit des Stoffes steigen, chemische Reaktionen einzugehen.

#### Publikation:

S. Schöne et al., in Chemistry – A European Journal, 2017 (DOI: 10.1002/chem.201703009)



Quelle: A. Ikeda-Ohno

## TUMORIMMUNOLOGIE

### Motivator für das Immunsystem

Mit einem neuen, gentechnisch hergestellten Medikament wollen Wissenschaftler des HZDR-Instituts für Radiopharmazeutische Krebsforschung und des Dresdner Universitätsklinikums Carl Gustav Carus eine besonders aggressive Form der Leukämie bekämpfen. Das Arzneimittel basiert auf dem speziell designten Eiweißbaustein „GEM333“. Im Patienten soll sich die Substanz mit einem Ende an bestimmte Immunzellen, den sogenannten T-Zellen, anheften. Das andere Ende bindet sich wiederum an die Krebszellen. Über diese Brücke können die Giftstoffe aus der Immun- in die Leukämiezelle wandern und sie zerstören. Nach 15 Jahren Forschung – einem vergleichsweise kurzen Zeitraum – erfüllt das Medikament nun alle Voraussetzungen für erste Anwendungen am Menschen. Anfang 2018 sollen mit der Substanz 35 Patienten in Dresden und Würzburg behandelt werden.

#### Publikation:

R. Aliperta et al., in Scientific Reports, 2017 (DOI: 10.1038/srep42855)

# 4.400

Gigawattstunden an elektrischer Energie verbrauchen kommunale Kläranlagen in Deutschland pro Jahr – in etwa die Jahresleistung eines modernen Kohlekraftwerks. Besonders energieintensiv sind bei der Abwasseraufbereitung Prozesse in den Belebungsbecken, in denen Bakterien unter Zufuhr von Sauerstoff Kohlenstoff- und Ammoniumverbindungen abbauen. In den meisten Kläranlagen übersteigt jedoch die aufgewendete Energie den tatsächlichen Bedarf, da sie nicht optimal ausgelegt sind. Geeignete Mess- und Simulationsmethoden, um die komplexen Vorgänge in den Becken nachzuvollziehen, fehlten bislang. Gemeinsam mit Kollegen der TU Dortmund und des Instituts für Wasser und Energie Bochum konnten Wissenschaftler des HZDR-Instituts für Fluidynamik Modelle entwickeln, die die Strömungsverhältnisse gut vorher-sagen. Darauf aufbauend wollen sie bessere Vermischungs- und Belüftungsstrategien entwerfen.

#### Publikation:

A.E. Sommer et al., in Flow Measurement and Instrumentation, 2017 (DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.05.008) – Gefördert durch Deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ30799)



Quelle: HadelProductions / istock

# Deutschlands verborgene Schätze

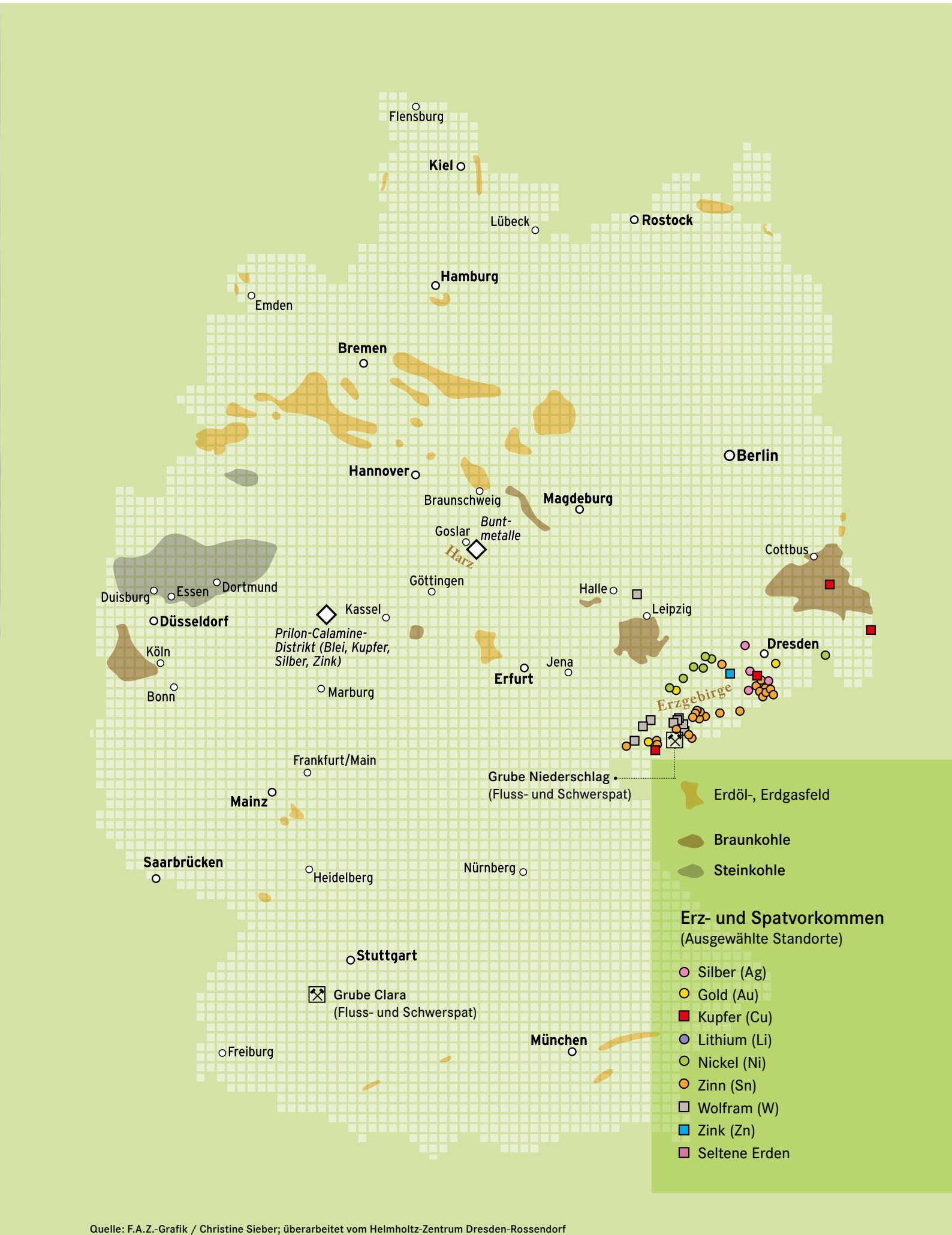
Die Energiewende verändert unseren Rohstoffverbrauch nachhaltig. Während sich langfristig der Bedarf an Kohle, Öl und Gas verringert, steigt gleichzeitig die Nachfrage nach metallischen Rohstoffen, um energieeffiziente Wind- und Solaranlagen, Batterie- und Wasserstoffspeicher oder andere Systeme herzustellen. Dazu sind in Deutschland längst nicht alle Potentiale genutzt.

Text . Marcus Schick

Dieser Text wiegt schwer. Denn er ist auf einem PC geschrieben. Nach Schätzungen des Wuppertal-Instituts und einer UN-Studie sind etwa 19.000 Kilogramm Rohstoffe, einschließlich der zur Energiegewinnung hinzugezogenen Brennstoffe, nötig, um einen einzigen PC herzustellen. Neben rund 1.500 Litern Wasser werden dazu 22 Kilogramm chemischer Stoffe und 240 Kilogramm fossile Energieträger gebraucht. Aber es sind vor allem Edel- und Buntmetalle, die einem Computer sein Rechenvermögen beibringen. Allen voran Kupfer, Zinn, Gold, Tantal und viele andere Metalle aus

allen Teilen der Welt. Und weil zu diesem Text auch noch viele Telefonate nötig waren, müssten in seine Rohstoffbilanz auch noch die stationären und mobilen Telefongeräte eingerechnet werden.

Doch genug der Rechenspiele. Fest steht: Rohstoffe sind in unserem Leben allgegenwärtig und nicht mehr wegzudenken. Denn sie bilden über PCs und Telefone hinaus den Kern nahezu jeglicher Technik und Elektronik. Rohstoffe sind Teil der DNA des technologischen Fortschritts. Sie sind alternativlos ➤

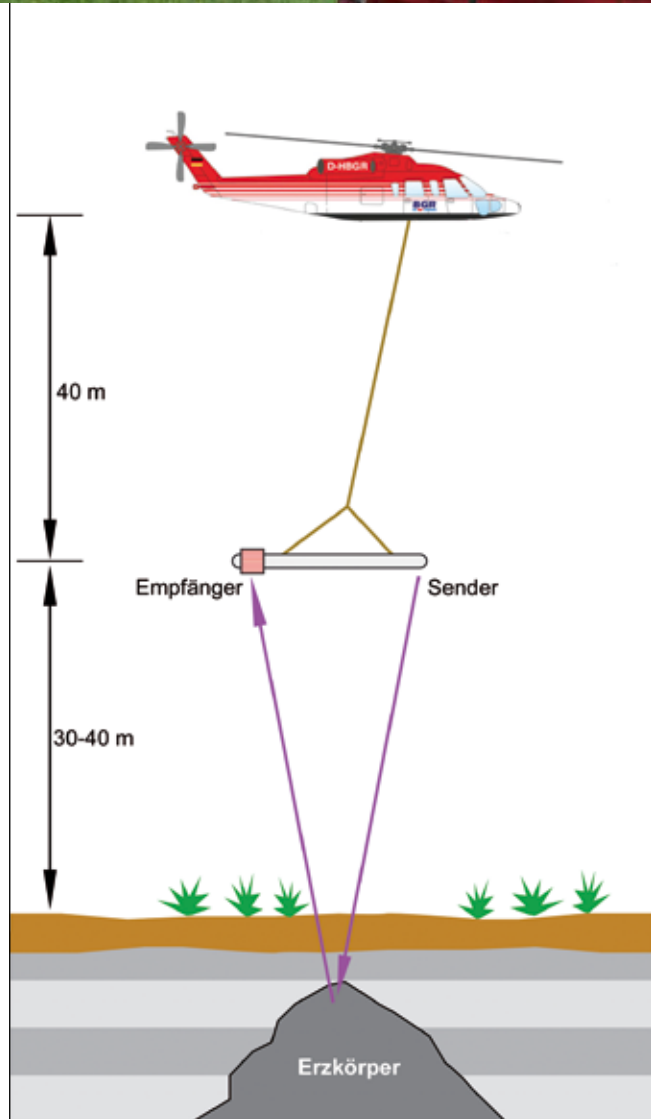




Exploration ohne Eingriff in die Natur: Per Helikopter suchen im sächsischen Erzgebirge Freiburger Forscher nach Rohstoffen. Am Hubschrauber hängt dafür eine Sonde, die elektromagnetische Signale senden und empfangen kann. Auf diese Weise erhalten die Wissenschaftler Informationen über die elektrische Leitfähigkeit des Untergrunds, was ein Anzeichen für mögliche Erzkörper ist. Quelle: VNG / D. Müller (oben)

– und zumeist nur begrenzt verfügbar. Und genau darin liegt das Dilemma für Industrienationen wie Deutschland. Denn Deutschland hat sich der Energiewende verschrieben und will seinen Energiebedarf zunehmend über Wind- und Solaranlagen abdecken. Ohne Rohstoffe funktionieren die erneuerbaren Quellen nicht. Zwar verringert sich durch ihren Einsatz langfristig der Bedarf an Kohle, Öl und Gas. Gleichzeitig steigt jedoch der Verbrauch an metallischen Rohstoffen. Diese werden zwingend gebraucht, um die Anlagen zur Stromgewinnung aus erneuerbaren Quellen und zur Speicherung der Energie herzustellen.

„Für die neuen Energietechnologien kommen großteils die gleichen Rohstoffe zum Einsatz wie für andere Hightech-Produkte“, erklärt Jens Gutzmer, Direktor am Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf. Dazu zählen vor allem



Technologiemetalle wie Kupfer, Kobalt, Platingruppen-Metalle, Sondermetalle wie Indium, Tellur, Gallium und Germanium oder Seltene-Erden-Elemente. Diese, so Gutzmer weiter, sind für den Energiesektor genauso essentiell wie für die Automobilindustrie oder für die Elektronik-, Informations- und Kommunikationsbranche: „Da Deutschland so gut wie keine eigene Bergbauproduktion an Metallen hat und zudem die Recyclingraten bei Rohstoffen wie den Seltene-Erden-Elementen oder Indium, Tellur, Gallium und Germanium sehr gering sind, ist Deutschland in hohem Maße auf die Einfuhr von Metallrohstoffen und Zwischenprodukten angewiesen.“

### Kritische Rohstoffe im Blick

Die Politik sieht angesichts dieses Befundes die nachhaltige Sicherung der Rohstoffversorgung als Aufgabe der Wirtschaft. Mit ihrer Rohstoffstrategie schafft die Bundesregierung dafür die erforderlichen Rahmenbedingungen. Innerhalb eines global transparenten und fairen Handels zielt diese mit einem ganzen Maßnahmenbündel darauf ab, den Zugang zu Ressourcen zu verbessern. Dazu zählen die Eröffnung neuer Optionen durch Substitutions- und Materialforschung, die weitere Fokussierung auf rohstoffbezogene Forschungsprogramme, die Herstellung von Transparenz und Good Governance bei der Rohstoffgewinnung sowie die Verzahnung nationaler Maßnahmen mit der europäischen Rohstoffpolitik. Hinzu kommen strukturelle Maßnahmen wie die Einrichtung der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die Gründung des Helmholtz-Instituts in Freiberg oder das Einsetzen des Interministeriellen Ausschusses (IMA) Rohstoffe.

Profitieren soll von deren Kenntnissen und Beratung nicht zuletzt die Industrie, insbesondere auch kleine- und mittlere Unternehmen (KMU). Aus dem Monitoring kritischer Ressourcen werden zudem Informationen über Angebots- und Nachfragetrends für mineralische Rohstoffe bereitgestellt, um potentielle Preis- und Lieferrisiken sowie Fehlentwicklungen auf den Rohstoffmärkten frühzeitig zu erkennen. Alle diese Maßnahmen sind dabei immer mit dem Handeln der Bundesregierung auf europäischer Ebene eng verzahnt.

### Energiewende am Scheideweg

Wohin die Rohstoff-„Reise“ führt, zeigt sich aber immer erst in der Praxis. In ihrer Stellungnahme „Rohstoffe für die Energiewende – Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung“ hatten zuletzt die Experten der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften – acatech sowie der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften danach gefragt, ob die Umsetzung der Energiewende am Ende doch durch Rohstoffmangel gefährdet sein könnte. Rund 100 Fachleute hatten dazu innerhalb des Projektes „Energiesysteme der Zukunft“ in interdisziplinären Arbeitsgruppen Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren Energieversorgung erarbeitet.

Die gute Nachricht: In Deutschland kann eine ausreichende Versorgung mit Metallen, fossilen Energieträgern und Bioenergie sichergestellt werden. Weltweit gebe es genügend

natürliche Rohstofflagerstätten. Die Frage sei daher weniger, ob die Versorgung gewährleistet werden könne, sondern eher, wie dies gelinge. Entscheidend seien zum einen die Preise. Die Rechnung ist dabei recht einfach: Werden Metalle zu teuer, sind Investitionen in klimafreundlichere Technologien weniger wirtschaftlich. Genauso wichtig ist aber auch die Frage, ob und wie ethisch, gesundheitlich und ökologisch bedenkliche Abbaumethoden die gesellschaftliche Akzeptanz der Rohstoffgewinnung gefährden. „Deutschland braucht eine langfristig angelegte Rohstoffpolitik“, fordern die Autoren der Studie, „um offene und transparente Märkte sowie hohe Umwelt- und Sozialstandards zu fördern. Mehr Recycling, Bergbau in Deutschland, Europa und der Tiefsee sowie strategische Investitionen in Rohstoffprojekte können die Versorgungssicherheit verbessern.“

Während für Deutschland bei metallischen Rohstoffen und Zwischenprodukten kein Weg an der Einfuhr vorbeiführt, kann der Industriestandort bei Baurohstoffen wie Sand oder Kies und einigen Industriemineralen, zum Beispiel Kaolin und Gips, nahezu unbegrenzt auf die heimische Produktion bauen. Einschränkungen resultieren hier nur aus konkurrierenden Nutzungsansprüchen wie Natur- oder Trinkwasserschutz.

### Geopotentiale nutzbar machen

Die geologische Verfügbarkeit der vorhandenen Rohstoffe errechnen Experten dabei aus den jeweils bereits erschlossenen Reserven, den Ressourcen – also den bekannten, aber mit heutiger Technik bei heutigen Preisen noch nicht förderbaren Rohstoffen – sowie den Geopotentialen. Darunter versteht man noch nicht nachgewiesene Vorkommen, die beispielsweise in bestimmten geologischen Strukturen vermutet werden. „Durch Exploration, Weiterentwicklung der Bergbau-, Förder- und Aufbereitungstechnik und steigende Marktpreise können Geopotentiale und Ressourcen in Reserven umgewandelt werden“, erklärt Jens Gutzmer. Dies führt dazu, dass die Reserven der meisten Rohstoffe mit dem Verbrauch „mitwachsen“. Teilweise sogar überproportional zum Verbrauch. Zum Beispiel Erdöl: Von 1950 bis 2013 hatte sich der Verbrauch verachtacht, gleichzeitig waren aber die Reserven dank neuer Explorationsmöglichkeiten und neuer Fördertechnologien auf das Zwanzigfache gestiegen.

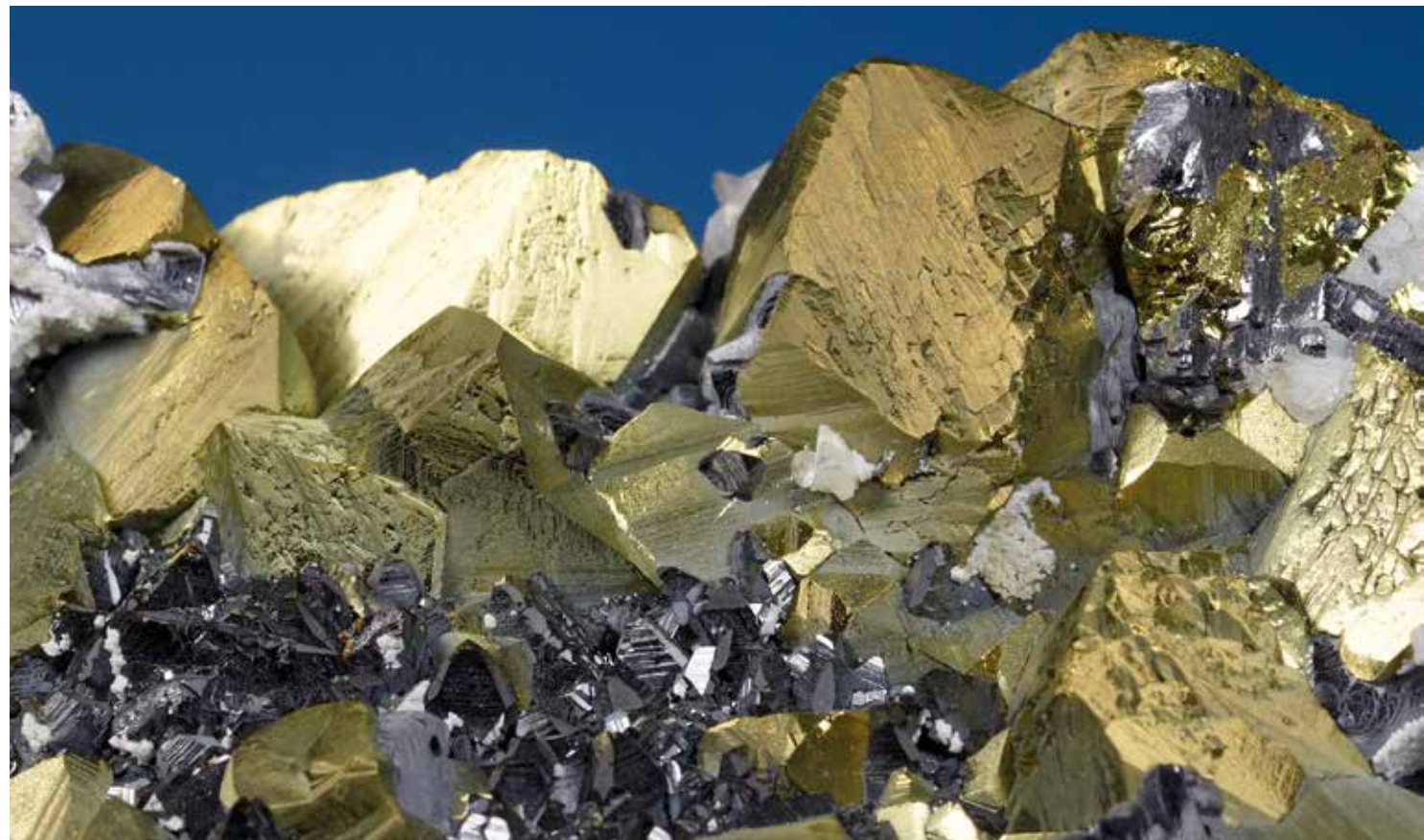
Ob dies auch für mineralische Rohstoffe zutreffen kann? Wünschenswert wäre es. So zeigt beispielsweise eine aktuelle Risikoanalyse der DERA zum Thema Lithium, dass sich die Nachfrage nach diesem für derzeitige Batterien entscheidenden Alkalimetall bis 2025 verdreifachen könnte. Wenn die Elektromobilität jetzt – maßgeblich angeschoben durch hohe staatlich verordnete Quoten in China – weltweit richtig Fahrt aufnimmt, schätzen die DERA-Experten, dass sich zudem die Gesamtnachfrage nach Kobalt in diesem Zeitraum mehr als verdoppeln werde. Auch der Graphitmarkt würde durch die weltweit boomende Batterieproduktion erheblich in Bewegung kommen. Der Grund: Graphit kommt sowohl als synthetischer als auch natürlicher Kugelgraphit in den Anoden der Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz. Rund 1,1 Kilogramm Graphit werden pro Kilowattstunde Batteriekapazität in modernen Elektroautos gebraucht. Lithium und Kobalt benötigt die Industrie vor allem als Material für die Kathoden. >

## Circular Economy: Mining im Elektroschrott

Das Beispiel Elektromobilität, aber auch Nachfragespitzen, die sich aus dem Ausbau Erneuerbarer Energien ergeben, rücken speziell in Deutschland neben der rudimentären Primärproduktion durch Bergbau die sogenannten „sekundären Lagerstätten“ ins Blickfeld. In einer zunehmend kreislauf-orientierten Wirtschaft, der Circular Economy, spielen längst auch die Rohstoffe eine wichtige Rolle, die aus Altgeräten und Infrastruktur wiedergewonnen werden können. Auch damit lässt sich angebotsseitig auf nachfragebedingte Knappheit reagieren. Überhaupt führen Verknappung und Preisanstiege in der Regel zu einer effizienteren und sparsameren Verwendung oder – wenn möglich – zu einer Substitution durch einen anderen, ebenso oder sogar besser geeigneten Rohstoff. „Dieser Regelkreis hat in den vergangenen hundert Jahren dazu geführt, dass sich die realen Preise der meisten Rohstoffe im Durchschnitt kaum erhöht haben“, stellt Gutzmer fest.

Über die Erschließung dieser „sekundären Lagerstätten“ hinaus ist die Forschung gefordert, durch technischen Fortschritt die Voraussetzungen dafür zu schaffen, bislang unentdeckte Vorkommen potentiell nutzbar zu machen. „In Deutschland spielt die Rohstoffexploration derzeit allerdings keine nennenswerte Rolle“, schätzt Richard Gloaguen, HIF-Abteilungsleiter Erkundung ein. „Zum einen weil es den weitverbreiteten Irrglauben gibt, dass es in Deutschland nur wenige Mineralrohstoff-Lagerstätten gäbe, zum anderen weil es an der politischen und gesellschaftlichen Akzeptanz weiterer

⌌ Kristallaggregate enthalten wichtige Metalle, wie Indium, Germanium oder Silber. HZDR-Forscher arbeiten an innovativen Verfahren, um sie effizienter aufzubereiten. Quelle: J. Jeibmann ⌋



Bergbauaktivitäten fehlt.“ Kritische Rohstoffe, die „systemrelevant“ für bestimmte Industrien im Energie- und Informationstechnologiebereich seien, kommen überwiegend aus dem Ausland, vor allem aus den rohstoffreichen Schwellenländern China, Brasilien oder Südafrika, aber auch aus Entwicklungsländern wie der Demokratischen Republik Kongo.

## Früher uninteressant – heute äußerst relevant

Es gibt aber auch einige wenige Lagerstätten für kritische Rohstoffe in Deutschland. So befindet sich im sächsischen Storkwitz ein Vorkommen für Seltene Erden. Schon zu Zeiten der DDR waren Geologen auf bestimmte Karbonatite gestoßen, die mit Elementen wie den Leichten Seltenen Erden und Niob, einem sehr gut zu bearbeitenden Schwermetall, angereichert sind. Die Wissenschaftler schätzten damals das Vorkommen auf rund 38.000 Tonnen Seltene Erden und 8.000 Tonnen Niob. Weil aber damals die Stoffe noch nicht für Smartphones und Katalysatoren benötigt wurden, gerieten die Vorkommen schnell in Vergessenheit.

„Anders als bei den im Fokus stehenden heimischen Lagerstätten von Kupfer, Lithium oder Zinn macht die Erschließung der Storkwitzer Vorkommen derzeit ökonomisch kaum Sinn“, erläutert Richard Gloaguen. Den Wissenschaftler und sein 20-köpfiges Forscherteam beschäftigen Fragen, wie sich die Mineralrohstoff-Exploration in einem gesellschaftlich akzeptierten Rahmen durchführen lässt und mit welchen nichtinvasiven Methoden es gelingen kann, dabei die Umwelt- und Lärmbelastung zu minimieren.

Um den Bodenschätzen näher zu kommen, gehen die Wissenschaftler in die Luft: „Die Exploration mit Hilfe von Kameras und spezieller Sensorik aus der Vogelperspektive ebnet sozial- und umweltverträgliche Wege“, erklärt Gloaguen. Seine Forscher arbeiten dazu mit verschiedenen Drohnen,

die sie je nach Tragfähigkeit mit Hochleistungskameras und Sensoren ausstatten. „Die Drohnen liefern uns die Daten für eine Kartierung der Oberfläche und entsprechende Indizien für ein mögliches Rohstoffpotential im Untergrund“, sagt Gloaguen. „Die Ergebnisse dienen uns als Grundlage für unterschiedlichste, ‚sanfte‘ bergbauliche Erkundungsmaßnahmen. Wir können damit vor allem den Menschen in den betroffenen Gebieten sehr genau vorhersagen, was die Rohstofferschließung für sie und die Natur bedeutet, welche Methoden dabei zur Anwendung kommen und worauf sich Geologen vor Ort einstellen müssen.“

## Forschung in Farbe: die Signatur der Mineralien

Statt zur Exploration mit Baggern, Pressluftschlämmern und anderem schweren Gerät anzurücken, arbeitet das HIF-Team mit sogenannten passiven Methoden. Die Drohnenkameras und -sensoren erfassen dabei die Rückstrahlung der Sonne von der Erdoberfläche. Weil Mineralien diese jeweils sehr unterschiedlich und in ihrer ganz eigenen Charakteristik spiegeln, gibt das Licht ein Bild der aufgezeichneten Vorkommen. „Unsere Farbsensoren erfassen weit mehr als Rot, Gelb und Blau in den unterschiedlichsten Nuancen und können auf diese Weise die eigene Signatur des jeweiligen Minerals lesen“, beschreibt Richard Gloaguen das Vorgehen. Eine weitere Methode mit gleichem Ziel ist die Messung des Magnetismus und des elektrischen Widerstands, der eisenreiche Minerale von den sie umgebenden Gesteinen unterscheidet.

Darüber hinaus testen die Explorationsforscher Sensoren auf Basis laserinduzierter Fluoreszenz. Hierbei wird das Material aus der Luft mit einem Laserstrahl beleuchtet und so eine Fluoreszenz des Materials angeregt. Diese hängt jeweils vom Absorptionsspektrum des jeweiligen Rohstoffs sowie von den Eigenschaften des Laserstrahls ab und liefert damit sehr genau Aufschluss über das erfasste Material. „Möglich macht dies eine hochleistungsfähige Datenverarbeitung, die dazu bereits die Möglichkeiten des Machine-Learning und der Künstlichen Intelligenz ausschöpft“, sagt Richard Gloaguen. „Wir wollen damit die Arbeit der Geologen unterstützen und ihnen dreidimensionale Abbilder der explorierten Gegenden liefern. Gemeinsam mit ihnen und in enger Verbindung mit Soziologen können wir so Szenarien für eine sozial- und umweltverträgliche Rohstoffgewinnung entwickeln.“

Daran ist die Bergbau-Community auch international sehr interessiert. Vor kurzem wies die Europäische Union der Erkundungsabteilung von Richard Gloaguen eine zentrale Rolle bei der Koordination des jüngst gestarteten EU-Projekts INFAC (Innovative Non-Invasive Fully Acceptable Exploration Technologies) zu. Die Aufgabe ist anspruchsvoll: In den nächsten drei Jahren sollen die Projektpartner die Potentiale einer gleichermaßen hocheffizienten wie „sanften“ Exploration erkunden und mit konkreten Daten und Erfahrungen unterfüttern. Damit auch künftig noch ausreichend Rohstoffe verfügbar sind: für neue Wege in Industrie- und Energiewirtschaft, für Wohlstand und nachhaltige Lebenswertigkeit. Und nicht zuletzt für all die PCs, auf denen mit Hilfe von nachhaltigem Rohstoffeinsatz auch künftig Beiträge über Forschung und Entwicklung verfasst werden können. Sie müssen nicht schwer sein. Aber es wäre gut, wenn das, wovon sie erzählen, Gewicht hätte.



⌌ Mit Hilfe von Drohnen und Hochleistungskameras entwickeln Forscher vom Freiburger Helmholtz-Institut neue Methoden zur umweltverträglichen Rohstofferkundung. ⌋

## Publikationen:

M. Frenzel, J. Kullik, M.A. Reuter, J. Gutzmer: Raw material ‘criticality’ – sense or nonsense?, Journal of Physics: D, Applied Physics, 2017 (DOI: 10.1088/1361-6463/aa5b64)

G. Angerer, P. Buchholz, J. Gutzmer, C. Hagelüken, P. Herzig, R. Littke, R.K. Thauer, F.-W. Wellmer: Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft: Geologie, Märkte, Umwelteinflüsse, Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, 2016.

Rohstoffe für die Energiewende. Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, Berlin 2017.

S. Jakob, R. Zimmermann, R. Gloaguen: The need for accurate geometric and radiometric corrections of drone-borne hyperspectral data for mineral exploration: MEPHySto – A toolbox for pre-processing drone-borne hyperspectral data, Remote Sensing, 2017 (DOI: 10.3390/rs9010088)

R. Zimmermann, M. Brandmeier, L. Andreani, K. Mhopjeni, R. Gloaguen: Remote sensing exploration of Nb-Ta-LREE-enriched carbonatite (Epembe/Namibia), Remote Sensing, 2017 (DOI: 10.3390/rs8080620) ⌋

## Kontakt

Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie am HZDR  
Prof. Jens Gutzmer  
j.gutzmer@hzdr.de

Dr. Richard Gloaguen  
r.gloaguen@hzdr.de

# Ein Schaumbad für die Erze

Mineralische Rohstoffe kommen in der Natur nicht in reiner Form vor. Die in Erzen verwachsenen Wertpartikel müssen erst mühsam von anderen Stoffen getrennt und angereichert werden. Die wichtigste Methode dafür ist die Flotation. Wissenschaftler des HZDR untersuchen die zugrunde liegenden Mechanismen und Mikroprozesse mit dem Ziel, die industriellen Verfahren zu optimieren und die Gewinnungsrate bei der Rohstoffaufbereitung zu verbessern.

\_\_Text . Inge Gerdes

┌  
Doktorandin Anna-Elisabeth Sommer untersucht an einer Flotationszelle Strömungsprozesse. Quelle: S. Floss ┐



Was leichter ist als Wasser, schwimmt oben. Auf diesem Grundprinzip basiert die Stofftrennung durch Flotation (vom Englischen to float = schwimmen), auch Schaumflotation genannt. Ohne diese Methode der Aufbereitung wäre die Nutzung vieler Rohstoffe kaum möglich. „Im Gegensatz zu anderen Verfahren eignet sich die Flotation schon sehr gut zur Trennung feiner Partikel“, erklärt Martin Rudolph, Leiter der Abteilung Aufbereitung am Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF). „Allerdings kommen die Wertminerale in den Lagerstätten in immer winzigeren Fraktionen vor.“

Seine zehnköpfige Arbeitsgruppe am HIF und Wissenschaftler des HZDR-Instituts für Fluidodynamik suchen deshalb nach neuen Konzepten, auch kleinste Teilchen abzutrennen sowie die Rohstoff- und Energieeffizienz der Flotationsprozesse in der Industrie zu verbessern. Da zur Rohstoffgewinnung jährlich weltweit mehrere Milliarden Tonnen flотиert werden, bietet sich hier ein enormes Optimierungspotential. Anwendung findet die Schaumflotation nicht nur bei der Aufbereitung von Erzen, sondern zunehmend auch beim Wertstoffrecycling.

Das Verfahren nutzt die unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften von Mineralpartikeln, die darüber entscheiden, inwieweit sich Gasblasen dort anlagern können. Führt man einer Flüssigkeit mit fein gemahlenden Partikeln Gasblasen zu, haften die Blasen an Teilchen mit hydrophober, das heißt wasserabstoßender Oberfläche. Dadurch erhalten diese Auftrieb und steigen nach oben, während die unerwünschten hydro-

┌  
Bei der Schaumflotation werden wertvolle Minerale von taubem Gestein getrennt. Quelle: F. Schinski ┐

philen Körner in der flüssigen Phase, der Trübe, verbleiben. An der Oberfläche der Flüssigkeit bilden die „guten“ Partikel mit den angehängten Luftblasen eine Schaumschicht, die kontinuierlich abgeschöpft wird. Die übrigen Partikel, die sogenannte Gangart, pumpt man am Ende des Prozesses ab.

## Die Guten ins Töpfchen

Doch wie bringt man die Gasblasen dazu, im Flotationsbad die richtigen Partikel einzusammeln und zur Wasseroberfläche zu tragen? Das Gas hat nur dort eine Chance, an der Oberfläche haften zu bleiben, wo diese hydrophob und daher nicht mit einem Wasserfilm bedeckt ist. Typischerweise sind Mineralkörner in Wasser aber gut benetzt. Damit die guten am Ende ins Töpfchen – oder in diesem Fall in den Schaum – gelangen, wird die Benetzbarkeit der Wertstoffe gezielt chemisch beeinflusst. „Auf den jeweiligen Wertstoff zugeschnittene Reagenzien, sogenannte Sammler, machen deren Oberfläche hydrophob, während die anderen Komponenten hydrophil bleiben“, erläutert Martin Rudolph. „Auf diese Weise lässt sich die Schaumflotation an eine breite Palette von Mineralabscheidungen anpassen.“ >

Neben Sammlern kommen als weitere Hilfsstoffe sogenannte Drücker zum Einsatz, die bei den unerwünschten Körnchen die Benetzbarkeit verbessern und das Absinken im Flotationsbad beschleunigen. Als Schäumer bezeichnete Chemikalien sollen den Schaum mit den wertvollen Partikeln stabilisieren, damit diese Körnchen nicht wieder in die Flüssigkeit zurückfallen. Um gut flotierbar zu sein, sollten die Korngrößen etwa zwischen 20 bis 250 Mikrometer betragen. Das Erz wird entsprechend fein vermahlen und mit Sammlern selektiv hydrophobiert. Dann gelangt es als wässrige Aufschlämme in das Flotationsbad, wo beispielsweise ein Rührer Luft einträgt und fein verteilt. Ziel ist eine möglichst hohe Gewinnungsrate, die von verschiedenen Faktoren abhängt: Trübedichte, zugeführte Gasmenge, Partikel- und Blasengröße, verwendete Reagenzien und Strömungsdynamik – all das gilt es zu optimieren.

### Was passiert an der Grenzfläche?

„Wir können nur etwas verbessern, wenn wir wissen, was genau bei der Flotation passiert, vor allem auf der molekularen Ebene“, schätzt Rudolph ein. „Wenn im Wasser verteilte Partikel an Gasblasen anhaften, treffen gleich drei Phasen aufeinander: Feststoff, Flüssigkeit und Gas. Uns interessieren die Wechselwirkungen an den Grenzflächen, wo die verschiedenen Materialien miteinander in Kontakt kommen.“ Im Fokus der Freiburger Wissenschaftler stehen die Partikeloberflächen, an denen die Sammler- und Drücker-Reagenzien ansetzen, sowie die hydrodynamischen Prozesse.

Die Forscher interessieren sich nicht nur für die Oberflächeneigenschaften der Minerale, sondern auch dafür, wie verschiedene Reagenzien die Wechselwirkungskräfte in der Flotationszelle – dem Tank, in dem die Prozesse ablaufen – verändern. Eine Herausforderung im Hinblick auf die zunehmend komplexen Erze mit feinst verteilten Elementen. Mit der Rasterkraft-Mikroskopie (Atomic Force Microscopy, AFM) sind die Wissenschaftler in der Lage, solche komplexen Mineralphasen zu untersuchen und ihre Benetzungseigenschaften zu charakterisieren. AFM ist eine bildgebende Methode, mit der sich sehr kleinskalige Topografien bis hin zu Molekülen darstellen lassen. Die Wissenschaftler nutzen sie, um kleinste Kräfte zu messen und so den Wechselwirkungen auf die Spur zu kommen. Das gibt ihnen die Möglichkeit, die auf der Oberfläche verwachsener Rohstoffe auftretenden Kräfte zu kartieren und die Wirkung von Reagenzien zu berechnen.

„Mit dem von uns entwickelten Messwerkzeug auf Basis der Rasterkraft-Mikroskopie lässt sich bei einem neuen Rohstoff schnell der richtige Chemikalien-Cocktail für die Flotation definieren“, stellt Rudolph fest. „Da das bislang viel Zeit und Geld kostet, ist die Industrie daran sehr interessiert.“ In den nächsten fünf Jahren wollen er und sein Team den Prototyp einer Apparatur entwickeln, mit dem sich ein Screening für Flotationschemikalien durchführen lässt.

### Dynamik in der Flotationszelle

Nicht nur die Reagenzien, auch hydrodynamische Vorgänge beeinflussen das Ergebnis der Flotation. Die Strömungsverhältnisse bestimmen, wie oft ein Partikel auf eine Blase trifft und ob die Teilchen an den Blasen haften bleiben. Bei der Erforschung der komplexen Hydrodynamik in der Flotationszelle arbeiten die Wissenschaftler des HIF eng mit dem HZDR-Institut für Fluidodynamik zusammen, insbesondere mit der Abteilung „Transportprozesse an Grenzflächen“. Deren Leiterin, Kerstin Eckert, ist Spezialistin auf diesem Gebiet. „Wir schauen mit einer sehr feinen Brille auf die Mikroprozesse und die innere Dynamik bei der Flotation“, erläutert die Physikerin.

Im Fokus ihrer Arbeitsgruppe stehen vor allem feine Körnchen von weniger als 20 Mikrometern sowie Partikel, die zu groß sind, um im Schaum aufzusteigen. Bei Feinstpartikeln stößt die konventionelle Schaumflotation an ihre Grenzen, sodass hier bislang viele Wertstoffe verloren gehen. Das Thema ist auch für die Rohstoffgewinnung aus Althalden oder beim Recycling von Bedeutung. So könnte die Flotation eine Methode sein, um die feinen Lithium-Partikel aus Alt-Batterien zurückzugewinnen und wiederzuverwenden. Eine bessere Flotation von Großpartikeln lohnt sich wiederum, weil gröbere Körnung Energie fürs Mahlen der Erze spart.

Die vor einem Jahr von Kerstin Eckert gegründete fünfköpfige Forschergruppe untersucht verschiedene Effekte an den Grenzflächen in der Trübe und der Schaumphase. „Dazu zählen die elektrischen Ladungen auf Blasen und Partikeln oder Kräfte wie Oberflächenspannung und Kapillareffekte“, erklärt die Physikerin. „Wir wollen wissen, wie der trennende Wasserfilm bei der Anhaftung aufgebrochen wird. Denn das muss schnell gehen, solange Partikel und Blase sich nah genug sind.“ Um die Kollisionsrate und Haftwahrscheinlichkeit zu erhöhen, prüfen die Forscher auch prozessintensivierende Maßnahmen wie den Einsatz von Ultraschall.

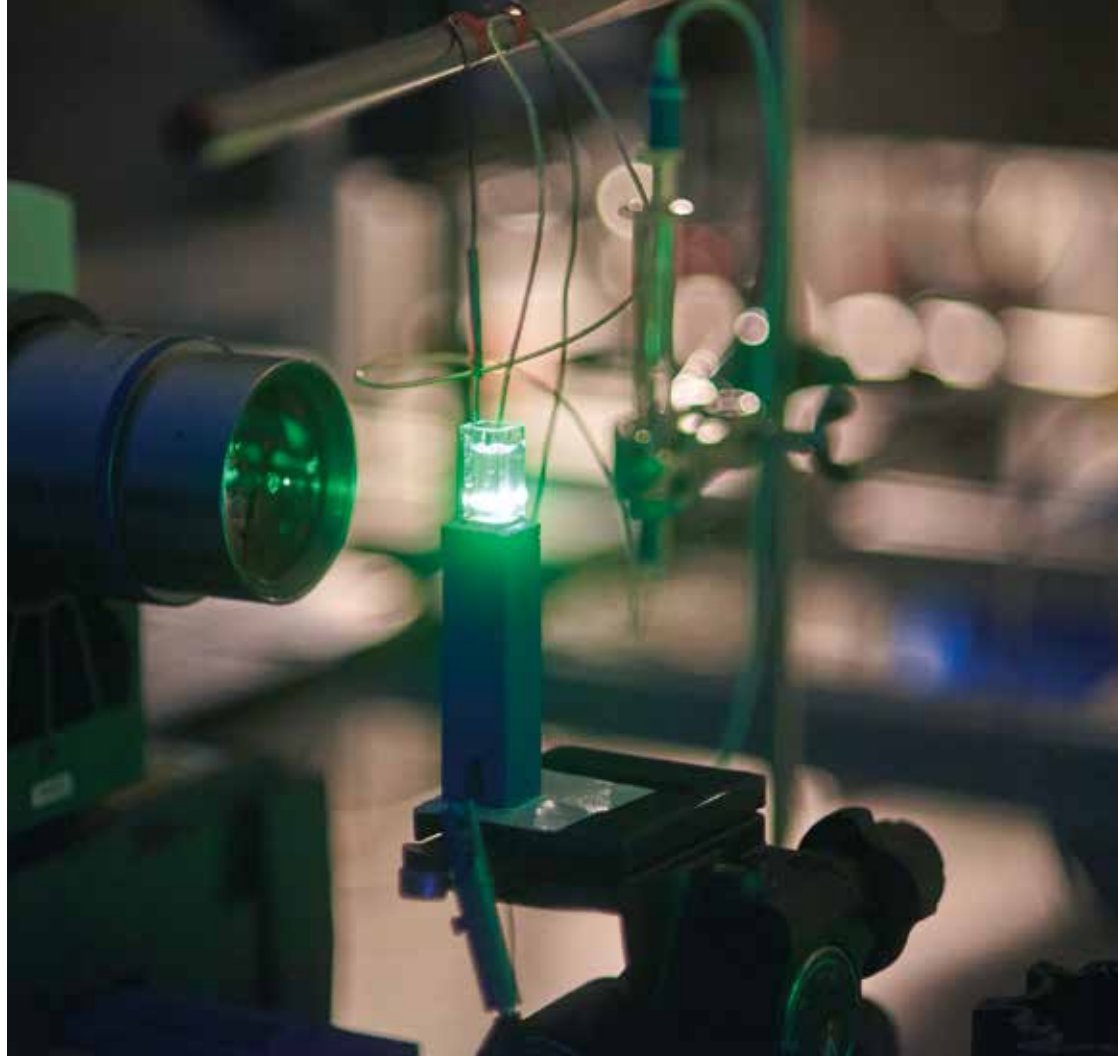
Experimentell sind die Prozesse schwer zugänglich, denn die Flotation findet buchstäblich im Trüben statt. Man sieht nur das Eingangsmaterial und die Ausgangsprodukte. Um zu verstehen, was im Inneren der Black Box geschieht, setzt Eckerts Abteilung auf Modellexperimente zu Teilprozessen mit neuen Messverfahren. Zum Beispiel eignen sich Neutronen sehr gut, um „Licht“ in die undurchsichtige Schaumphase und die darin stattfindenden Partikelbewegungen zu bringen. Genauso wichtig ist die Entwicklung von Computermodellen. >



┌ An einem sogenannten inversen Gaschromatographen kann Martin Rudolph die Oberflächeneigenschaften von Festkörpern ermitteln. Quelle: D. Müller ┐



Die Prozesse spielen sich bei der Flotation im wahrsten Sinne des Wortes im Trüben ab. Quelle: D. Müller



Die Ingenieure und Physiker am HZDR greifen deswegen neben der Rasterkraft-Mikroskopie und Simulationen auch auf Laser zurück, um Licht in das Dunkel zu bringen. Quelle: S. Floss



Das Ziel der Forscher um Martin Rudolph und Kerstin Eckert (im Bild): die grundlegenden Vorgänge genauer ergründen, um das Verfahren zu optimieren. Quelle: S. Floss

## Simulation für mehr Treffsicherheit

Ein Ansatz ist die „direkte numerische Simulation“. Team-Mitglied Gregory Lecrivain arbeitet an der Entwicklung eines Computermodells, mit dem er die Partikelanlagerung an Gasblasen-Grenzflächen simulieren will. Gemeinsam mit Kollegen der Kyoto Universität in Japan konnte er mit dem Programm „CAPTURE“ bereits ein Dreiphasenmodell entwickeln. Lecrivain gelang es, damit die Anlagerung hydrophober Partikel an einer aufsteigenden Gasblase zu simulieren. „Mein Ziel ist, den Code weiterzuentwickeln, um die Schaumaufbereitung nachzuahmen“, erklärt der Strömungsmechaniker. „Durch die drei Phasen und die hohe Komplexität ist das sehr schwierig, zumal die numerische Modellierung noch in den Kinderschuhen steckt.“

Nur wenn Luftblasen und hydrophobisierte Mineralkörnchen in Kontakt kommen, ist eine Anhaftung überhaupt möglich. Sehr feine Partikel treffen die Blasen oft gar nicht. Versuche in einer Blasensäule sollen neue Erkenntnisse bringen, wie sich die Kollisionsfrequenz erhöhen lässt. Indem die Forscher Modellpartikel mit einer Fluoreszenzmarkierung versehen, können sie mittels mehrerer Hochgeschwindigkeitskameras

Partikelpositionen und -bahnen rekonstruieren und Kollision und Haftung durch ein optisches Verfahren messen.

Die erzielten Forschungsergebnisse zu den Mikroprozessen fließen in komplexe Prozessmodelle ein, die verschiedene Parameter simulieren und bessere Vorhersagen ermöglichen sollen. Sie könnten in Zukunft die wesentlich teureren Pilotanlagen ersetzen. „Leider kann man die Flotation nicht mit einer einzigen Formel beschreiben“, weiß Martin Rudolph. „Und es gibt noch viele Bereiche mit einem großen Fragezeichen.“ Deshalb forscht seine Abteilung auch noch auf anderen Gebieten. Ein neues Projekt mit dem Titel „MultiDimFlot“ hat das Ziel, eine Technologie zur Trennung ultrafeiner Partikel zu entwickeln, die auf mehreren Merkmalen wie Größe, Form, Rauigkeit und Oberflächen-Benetzbarkeit basiert.

Währenddessen beschäftigt sich die Forschungsgruppe um Kerstin Eckert mit weiteren Anwendungsmöglichkeiten der Schaumflotation. Sie untersucht, ob sich die Methode auch zur Trennung von Mikroplastik, Textilteilchen und anderen Partikeln eignet. Da Mikroplastik-Teilchen meist rau sind und außen Lufteinschlüsse haben, stellt sich die Frage, wie sich das auf den Flotationsprozess auswirkt.

Als Koordinatorin des Netzwerkes „NetFlot“ setzt sich Eckert außerdem dafür ein, die Flotationskompetenzen auf europäischer Ebene zu vernetzen und ihre internationale Präsenz auszubauen. Beide Projektleiter sind sich einig: „Bisher sind Länder wie Australien und Kanada führend auf dem Gebiet, doch auf Tagungen zeigt sich, dass unsere Forschungen wahrgenommen werden.“

### Publikationen:

M. Rudolph, U.A. Peuker: Mapping hydrophobicity combining Afm and Raman spectroscopy, Minerals Engineering, 2014 (DOI: 10.1016/j.mineng.2014.05.010)

T. Leistner, M. Embrechts, T. Leißner, S. Chehreh Chelgani, I. Osbahr, R. Möckel, U.A. Peuker, M. Rudolph: A study of the reprocessing of fine and ultrafine cassiterite from gravity tailing residues by using various flotation techniques, Minerals Engineering, 2016 (DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.020)

Z. Lei, B. Fritzsche, K. Eckert: Evaporation-assisted magnetic separation of rare earth ions in aqueous solutions, The Journal of Physical Chemistry C, 2017 (DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b07344)

G. Lecrivain, R. Yamamoto, U. Hampel, T. Taniguchi: Direct numerical simulation of an arbitrarily shaped particle at a fluidic interface, Physical Review E, 2017 (DOI: 10.1103/PhysRevE.95.063107)

S. Heitkam, M. Rudolph, T. Lappan, M. Sarma, S. Eckert, P. Trtik, E. Lehmann, P. Vontobel, K. Eckert: Neutron imaging of froth structure and particle motion, Minerals Engineering, 2018 (im Druck)

### Kontakt

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

\_Institut für Fluidodynamik am HZDR  
Prof. Kerstin Eckert  
k.eckert@hzdr.de

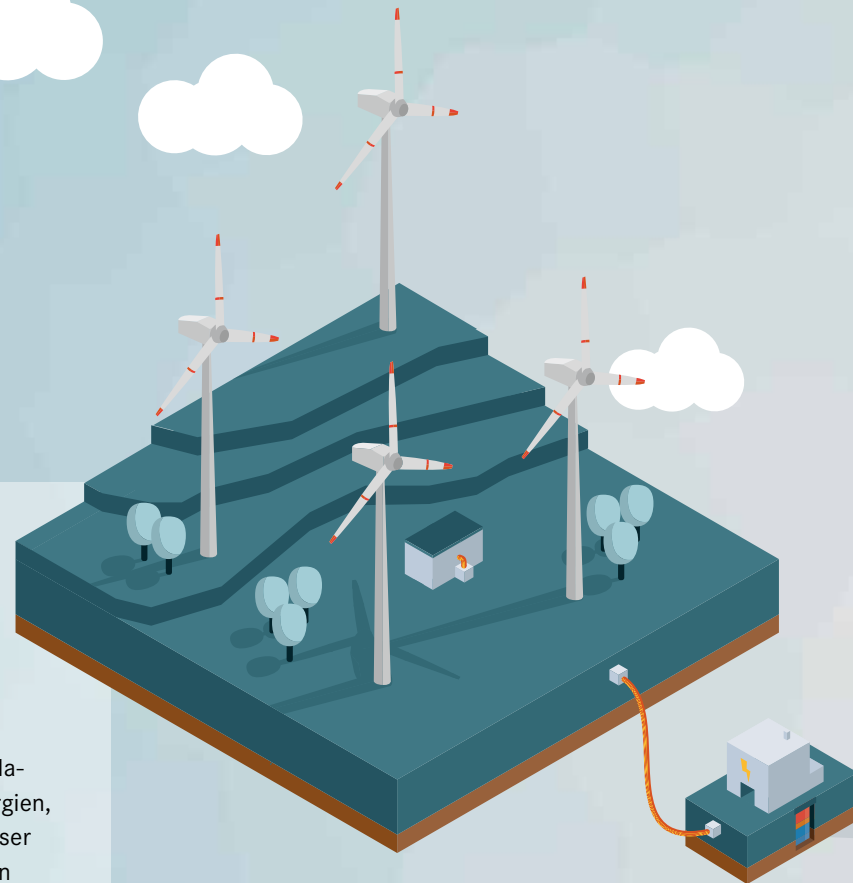
Dr. Gregory Lecrivain  
g.lecrivain@hzdr.de

➤ [www.netflot.eu/](http://www.netflot.eu/)

# Wenn der Wind nicht weht

Mit der Abschaltung aller Kernkraftwerke bis zum Jahr 2022 steigt Deutschland langfristig auf eine Energieversorgung um, die auf regenerativen und überwiegend schwankenden Quellen basiert.

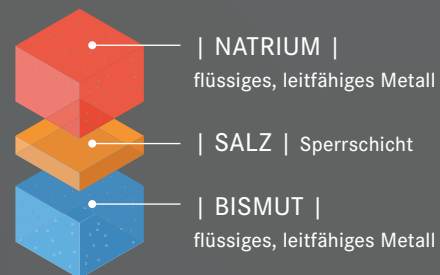
Text: Simon Schmitt Grafik: Ressourcenmangel



## NEUE SPEICHER FÜR FLUKTUIERENDEN STROMFLUSS

Durch den Ausbau der Stromnetze und Anlagen zur Gewinnung aus erneuerbaren Energien, wie Wind- oder Sonnenkraft, lässt sich dieser Wechsel nach Einschätzung vieler Experten noch vergleichsweise einfach umsetzen. Die wesentlich größere Herausforderung liegt darin, die verbundenen Fluktuationen abzufedern und eine unterbrechungsfreie Stromversorgung sicherzustellen. Dazu braucht es vor allem effiziente Verfahren, die den Strom lange speichern. Ingenieure vom HZDR arbeiten an einer Lösung, die das Potential hat, große Strommengen sehr preiswert zu speichern: eine Flüssigmetall-Batterie. Doch noch stellt die Skalierbarkeit die Forscher vor Probleme.

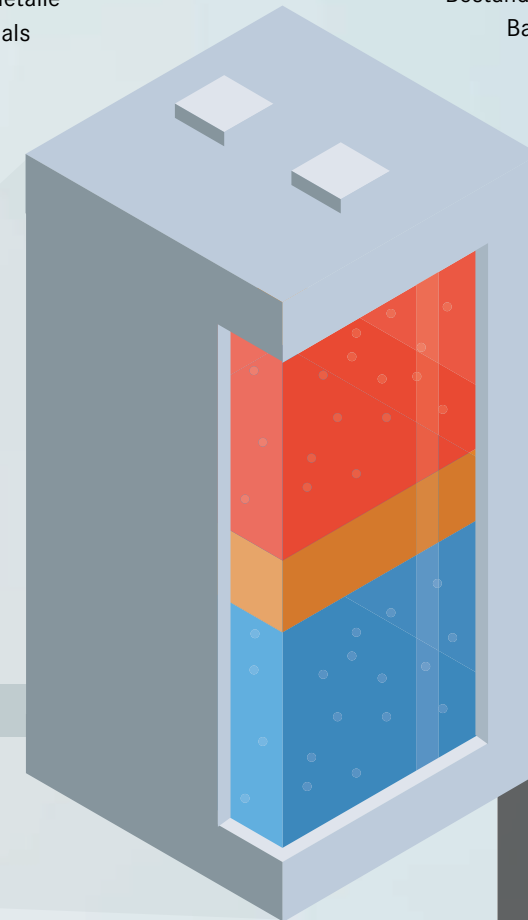
### BEISPIELZELLE



## SCHICHT PER SCHICHT ZUR BATTERIE

An sich ist das Grundprinzip einer Flüssigmetall-Batterie relativ einfach – es beruht auf zwei physikalischen Tatsachen. Zum einen ordnen sich Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte von selbst in Schichten an. Zum anderen sind flüssige Metalle leitfähig. Sie können also direkt als Anoden und Kathoden dienen. Füllt man zwei geeignete Metalle, zum Beispiel Natrium und Bismut, in einen Behälter, orientiert sich der schwerere Stoff automatisch nach unten. Über die Trennung der Metalle durch eine Schicht aus geschmolzenem Salz entsteht eine galvanische Zelle. Da die Metalle eine Legierung bilden wollen, müssen ihre Atome zunächst Elektronen abgeben, um die Schmelze als Ionen durchwandern

zu können. Auf der anderen Seite verbinden sie sich mit dem Metall, indem sie wiederum Elektronen aufnehmen. Beim Laden kehrt sich dieser Prozess um – die Legierung zerlegt sich wieder in ihre Bestandteile. „Dadurch lässt sich die Batterie beliebig oft auf- und entladen“, erläutert Tom Weier, der mit seinem Team den neuartigen Speicher entwickelt. „Das macht sie wirtschaftlich interessant. Das System kommt außerdem gut mit dem Regellastbetrieb zurecht, der ständig zwischen Abnahme und Zufuhr von Strom schwankt. Nach Ansicht des HZDR-Forschers sind einzelne Zellen mit einer Grundfläche von mehreren Quadratmetern möglich.



## DIE TURBULENZ IM SYSTEM

Die Vergrößerung der Zellen, die für den regulären Betrieb notwendig wäre, löst allerdings ein Problem aus. Da durch das Flüssigmetall extrem starke Ströme fließen, kann es zu elektromagnetischen Instabilitäten kommen, die heftige Bewegungen erzeugen. Im schlimmsten Fall könnte dies die Trennschicht so weit deformieren, dass sich die beiden Metalle direkt kontaktieren. Die Folge: ein

Kurzschluss und damit der Verlust des gespeicherten Stroms. Um die Strömungen zu beherrschen, haben die Dresdner Wissenschaftler verschiedene Lösungen entwickelt und patentiert. Sie sorgen für eine stets geschlossene Salzsicht. Derzeit liefert ihre Zelle bei einer Betriebstemperatur von 400 Grad Celsius pro Quadratzentimeter Elektrodenfläche einen Strom von über zwei Ampere.



Die Flüssigmetall-Batterien könnten den bei Überangebot gespeicherten Strom immer dann abgeben, wenn die Sonne nicht scheint oder die Windräder stillstehen.



### Kontakt

Institut für Fluidynamik am HZDR  
 Dr. Tom Weier  
 t.weier@hzdr.de

# Energiediät für Mikrochips

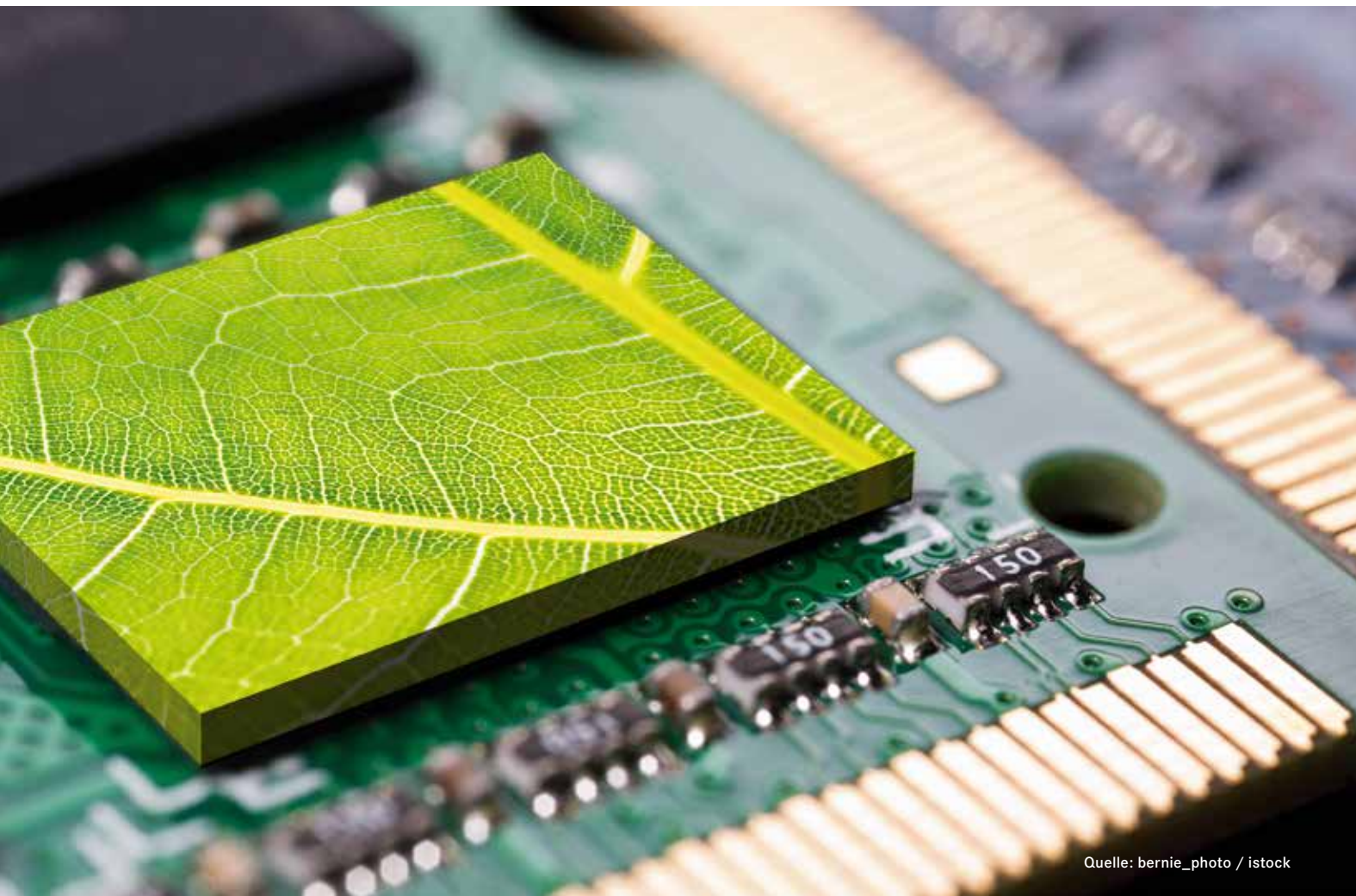
Der Energiehunger elektronischer Gerätschaften steigt stetig – es gibt schlicht immer mehr davon. HZDR-Forscher entwickeln Konzepte, mit denen künftige Computer und Datenspeicher deutlich weniger verbrauchen könnten.

Text . Frank Grotelüschen

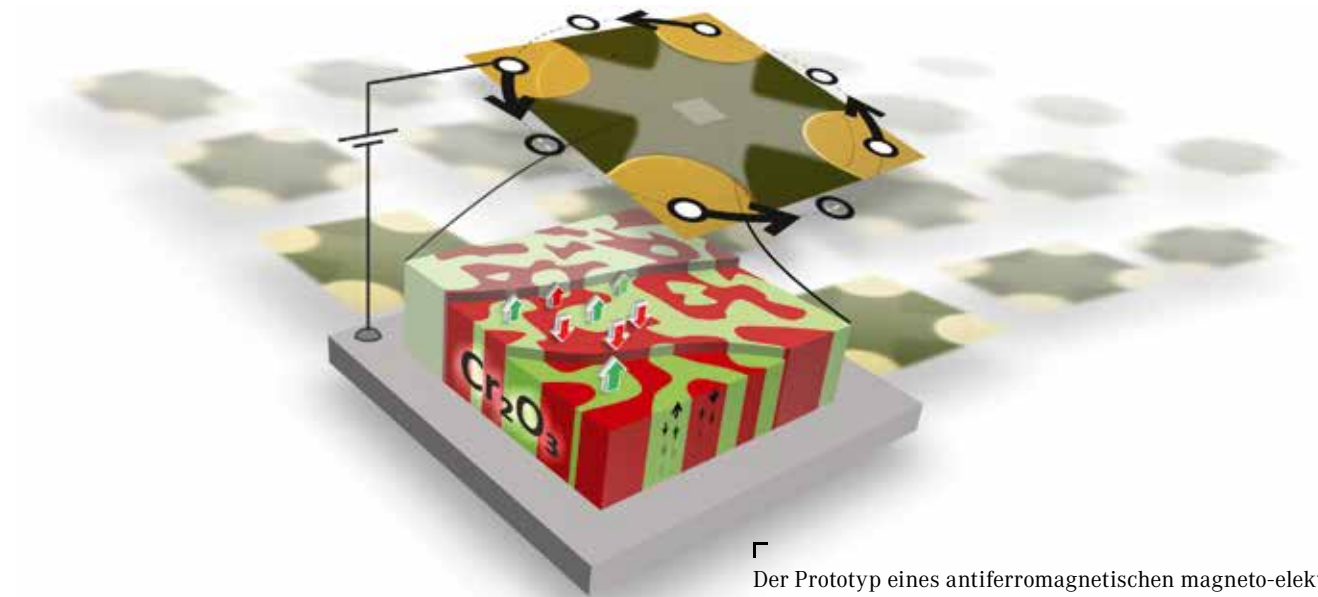
Internetrecherchen, Datenbankabfragen, Videokonferenzen – tagsüber läuft im Büro der Rechner heiß. In der Mittagspause dann der Blick aufs Smartphone: Eben mal die Mails checken und in die sozialen Netzwerke reinschauen. Und abends, gemütlich auf dem Sofa, gibt's per Streaming die neuesten Folgen der Lieblingsserie. So sieht heute der Alltag vieler Menschen aus – total vernetzt, Gigabyte-Flatrates und Digital-Abos inklusive. Doch die intensive Internetnutzung hat ihren Preis: Rechnerfarmen, Datenzentren und Endgeräte verbrauchen immer mehr Strom, Energiekosten und Treib-

hausgas-Emissionen steigen. Bereits heute sind Schätzungen zufolge 25 Großkraftwerke nötig, um den Strom für das weltweite Internet zu erzeugen – Tendenz steigend.

Deshalb arbeiten Forscher in Dresden an Strategien, die den Energiehunger von elektronischen Bauteilen drosseln. Um eine solche energieeffiziente Elektronik zu entwickeln, setzen die Experten verschiedene Hebel an: Die einen tüfteln an extrem sparsamen Speicherchips. Die anderen entwerfen Konzepte, um die Abwärme von Schaltkreisen als Energiequelle zu verwerten.



Quelle: bernie\_photo / istock



Der Prototyp eines antiferromagnetischen magneto-elektrischen Speicherchips besteht aus einer dünnen Chromoxid-Schicht zum Speichern. Darauf befindet sich eine weitere ultradünne Platinschicht, die zum Auslesen genutzt wird. Quelle: T. Kosub

Bislang nutzt man für jene Schaltprozesse, mit denen man Daten auf Speicherchips schreibt und ausliest, elektrische Ströme. Dabei aber entstehen erhebliche Verluste. „Nur fünf Prozent der eingesetzten Energie gehen in den eigentlichen Speicherprozess, der Rest wird verschwendet“, erklärt Denys Makarov, Gruppenleiter am HZDR-Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung. „Das ist ein ähnlich schlechter Wirkungsgrad wie bei einer Glühbirne.“

Nicht zuletzt dieser Umstand zwingt Internet-Konzerne und Cloud-Anbieter heute dazu, ihre wassergekühlten Rechnerfarmen in nördlichen Breiten aufzubauen. Nur in kalten Klimazonen lassen sich die Anlagen noch effizient kühlen. Da die Nachfrage nach Speicherkapazität auch künftig steigen wird, dürfte sich die Lage weiter verschärfen. „Meiner Ansicht nach ist der Energieverbrauch das größte kommende Problem bei der Datenspeicherung“, glaubt Makarov.

## Spannung statt Strom

Deshalb verfolgt sein Team zusammen mit Kollegen der Universität Basel und des Leibniz-Instituts für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden einen regelrechten Paradigmenwechsel: Statt eines Stroms dient eine elektrische Spannung zum Speichern und Auslesen der Daten. Der Ansatz verspricht eine enorme Einsparung: „Im Prinzip ließe sich der Energieverbrauch einer Speicherzelle auf ein Hundertstel drosseln“, erzählt Makarovs Kollege Tobias Kosub. 2016 haben die Physiker mit einem Prototyp bewiesen, dass das Konzept funktioniert – und konnten dabei ein wesentliches Problem lösen.

Kern des neuen Speicherelements ist eine dünne Schicht Chromoxid – ein sogenannter magneto-elektrischer antiferromagnetischer Isolator. Dieser besitzt vereinfacht gesagt eine innere magnetische Orientierung, die nur in zwei Richtungen zeigen kann. Die eine entspricht einer digitalen „1“, die andere einer digitalen „0“. Lange jedoch wusste die Fachwelt nicht, wie sich ein solches Speicherelement effizient auslesen lässt. Dazu war bisher eine weitere, ferromagnetische Komponente

nötig – was den Verbrauchsvorteil weitgehend zunichtemachte. Dieses Problem konnten die Dresdner Wissenschaftler im vergangenen Jahr lösen. Mithilfe eines physikalischen Phänomens, dem anomalen Hall-Effekt, gelang es ihnen, auf das Bit, das sie zuvor im Antiferromagneten gespeichert hatten, direkt zuzugreifen. „Damit lässt sich das Signal sehr zuverlässig auslesen“, sagt Kosub.

Konnten die HZDR-Wissenschaftler anfangs nur ein einziges Bit auf ihrem Prototyp ablegen, arbeiten sie nun an einem Modell mit mehreren Bits. Für eine Anwendung müssten es natürlich noch deutlich mehr sein, das weiß auch Denys Makarov: „Aber diese Technologieentwicklung ist in einem Forschungslabor schwierig zu schaffen, das wäre Aufgabe der Industrie.“

Stattdessen sind die HZDR-Forscher derzeit dabei, ihre Methode zu verfeinern und empfindlicher zu machen. „Außerdem müssen die Bauteile verkleinert werden“, erläutert Makarov. „Nur dann ist dieses Konzept für die Industrie interessant.“ Die derzeitigen Prototypen haben noch die Ausmaße von Mikrometern. Nötig wären Strukturen in der Größenordnung von einigen Dutzend Nanometern. Das jedoch ist mit Chromoxid als aktivem Material nur schwer machbar, weshalb es die Experten nun mit anderen antiferromagnetischen Stoffen versuchen.

## Sparkur für die Cloud

„Unsere Gruppe ist besonders gut darin, neue Prototypen zu vermessen“, beschreibt Makarov. „In unserem Labor untersuchen wir die Proben von Forscherteams aus aller Welt.“ Dafür haben die Dresdner eine Messelektronik konstruiert, die elektrische Größen mit äußerster Präzision messen kann, zum Beispiel Widerstandswerte. Im Rahmen eines Spin-offs entwickelt ein Team um Tobias Kosub das Patent derzeit zu einem Produkt weiter – ein potentiell interessantes Werkzeug nicht nur für Forschungslabors, sondern auch für die Industrie. ➤

Quelle:Shai\_Halud / Shutterstock



Tobias Kosub (rechts) forscht an neuartigen Speicherchips, die den Energieverbrauch deutlich senken könnten. Quelle: S. Floss



Sollte der „Speicherchip auf Energiediät“ eines Tages anwendungsreif sein, dürften sich erste Produkte vor allem in Nischenmärkten finden. Auf Satelliten etwa ist Energie oft Mangelware, hier wären stromsparende Speicherchips höchst hilfreich. Zudem könnten sie zuverlässiger als konventionelle Bauteile sein und weniger empfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen. Auch für die Verwendung in Automobilen verspricht das neue Konzept einiges – es könnte verlässlicher arbeiten und weniger stör anfällig sein als die derzeit verwendeten Komponenten.

Für den Einsatz in Cloud-Datenzentren wären die Hürden allerdings hoch. Hier dominieren derzeit Festplatten als Speichermedien – regelrechte Stromfresser. „Zwar könnte unsere Technik für beträchtliche Energieeinsparungen sorgen“, betont Makarov. „Aber es könnte schwierig sein, mit den Kosten zu konkurrieren, denn Festplatten sind spottbillig.“ In fernerer Zukunft aber könnte die neue Technik mit einem weiteren Vorteil punkten: Sie erlaubt schnellere Schreib- und Lesegeschwindigkeiten als eine Festplatte – was insbesondere interessant wäre, wenn künftige Internetleitungen schnellere Datentransfers ermöglichen. Auch für portable Endgeräte könnten Speicherchips auf Antiferromagnet-Basis dann relevant sein. Die nämlich wären für das ultraschnelle Funknetz von übermorgen gut gerüstet.

### Abwärme als Energiequelle

Einen alternativen Ansatz verfolgt ein anderes HZDR-Team vom selben Institut. „Jeder, der sein Smartphone in die Hand nimmt, merkt: Es ist warm, weil sich die Chips beim Rechnen aufheizen“, sagt Abteilungsleiter Jürgen Lindner. „Wir haben eine Idee entwickelt, wie man diese Abwärme zum Teil rückgewinnen könnte.“ Das Prinzip: Unterhalb einer Leiterbahn,

die sich durch den Stromfluss unweigerlich aufheizt, wird eine hauchdünne Schicht angebracht, bestehend aus einem speziellen, wärmeisolierenden Permanentmagneten. Dieser bietet die spannende Möglichkeit, einen Teil der Verlustwärme direkt in ein Hochfrequenzsignal umzuwandeln. Mit dieser Hochfrequenz ließen sich dann andere Bauteile mit Energie versorgen, etwa die Sendechips eines Handys oder der Taktgeber eines Prozessors.

Eine clevere Energierückgewinnung, hinter der folgender Mechanismus steckt: Zwar wird die dünne Magnetschicht von der über ihr liegenden Leiterbahn erwärmt. Aber da sie Wärme schlecht leitet, ist diese Erwärmung höchst ungleichmäßig: Direkt an der Grenzfläche nimmt die Magnetschicht dieselbe Temperatur wie die Leiterbahn an – unten aber ist sie deutlich kühler. Auf den ersten Blick scheint die Differenz von etwa sechs Grad nicht sehr groß. Doch hält man sich vor Augen, dass die Schicht gerade mal 20 Nanometer misst, ergibt sich ein gehöriges Temperaturgefälle – als wäre die Oberseite einer Münze etwa eine halbe Million Grad wärmer als deren Unterseite.

### Rückgewinnung im Mikrokosmos

Auf die Elektronen in den beiden Materialien – Leiterbahn wie Magnetschicht – hat das Temperaturgefälle eine ungewöhnliche Wirkung: Es dient als Triebfeder für einen sogenannten Spinstrom, eine Art „magnetische Völkerwanderung“. Als Folge dieser Wanderung bildet sich in der hauchdünnen Magnetschicht eine magnetische Oszillation aus, die wie in einem Fahrraddynamo in ein elektrisches Wechselfeld verwandelt werden kann und sich so nutzbar machen ließe.

Um zu prüfen, ob sich die Idee in die Tat umsetzen lässt, bauten Lindner und seine Kollegen einen Prototyp – einen ma-

gnetischen Nano-Oszillator, in dem die durch den Spinstrom angetriebene Magnetisierung schwingt. Das Bauteil besteht aus einem Platinstreifen, ein paar Mikrometer lang und 300 Nanometer breit. Unter diesem Streifen klebt eine dünne Schicht aus Yttrium-Eisen-Granat (Yttrium Iron Garnet, YIG) – ein Permanentmagnet, der weder Strom noch Wärme leitet. „Damit konnten wir gemeinsam mit kalifornischen Physikern zeigen, dass man mit einer Temperaturdifferenz tatsächlich ein Hochfrequenzsignal erzeugen kann“, sagt Lindner. „Damit haben wir nachgewiesen, dass das Konzept funktioniert.“

Bevor aber an technische Anwendungen zu denken ist, müssen die Physiker noch grundlegende Fragen beantworten. „Es gibt ein zweites Phänomen, das in der YIG-Schicht eine Hochfrequenz erzeugt“, erläutert Lindner. „Denn der Gleichstrom, der durch das Platin fließt, erwärmt das Metall nicht nur, sondern induziert im YIG-Streifen unweigerlich auch direkt eine Art magnetischen Kreiseffekt.“ Zwar deuten die Messungen darauf hin, dass sich dieser Effekt geringer auswirkt als die Hochfrequenz-Erzeugung via Temperaturgefälle, aber genauer sagen können dies die Forscher erst nach weiteren Versuchen, die sie nun planen: Sie wollen den YIG-Streifen nicht per Stromfluss durch das Platin erhitzen, sondern mithilfe eines Lasers. Dadurch wäre der „Gleichstrom-Effekt“ ausgeschaltet, sodass man den Einfluss des Temperaturgefälles direkt bestimmen könnte.

Und mit welcher Effizienz läuft der Prozess ab, wie viel Abwärme lässt sich in nutzbare Hochfrequenz umwandeln? „Das konnten wir noch nicht messen“, sagt Jürgen Lindner – und verweist auf künftige Experimente. Klar aber scheint: Das bislang verwendete YIG dürfte sich kaum für den kommerziellen Einsatz eignen – es ist schlicht zu teuer. Deshalb suchen die Materialforscher bereits nach billigeren und zugleich effekti-

veren Alternativen. „Mit den richtigen Materialien sowie einer optimierten Methode, das Hochfrequenzsignal auszukoppeln, halte ich im Prinzip eine Effizienz von einigen zehn Prozent für möglich“, meint Lindner. Das bedeutet: Mehr als die Hälfte der Abwärme ließe sich in nutzbare Hochfrequenz umwandeln. Ein erstes Einsatzfeld könnte im Weltall liegen: Auf Raumsonden ist Energie kostbar, die Rückgewinnung der Abwärme dürfte sich mehr als lohnen.

### Publikationen:

T. Kosub, M. Kopte, R. Hühne, P. Appel, B. Shields, P. Male-tinsky, R. Hübner, M.O. Liedke, J. Fassbender, O.G. Schmidt, D. Makarov: Purely antiferromagnetic magnetoelectric random access memory, Nature Communications, 2017 (DOI: 10.1038/NCOMMS13985)

Z. Duan, A. Smith, L. Yang, B. Youngblood, J. Lindner, V.E. Demidov, S.O. Demokritov, I.N. Krivorotov: Nanowire spin torque oscillator driven by spin orbit torques, Nature Communications, 2014 (DOI: 10.1038/ncomms6616)

C. Safranski, I. Barsukov, H.K. Lee, T. Schneider, A.A. Jara, A. Smith, H. Chang, K. Lenz, J. Lindner, Y. Tserkovnyak, M. Wu, I.N. Krivorotov: Spin caloritronic nano-oscillator, Nature Communications, 2017 (DOI: 10.1038/s41467-017-00184-5)

### Kontakt

Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung am HZDR  
Dr. Denys Makarov  
d.makarov@hzdr.de

Dr. Tobias Kosub  
t.kosub@hzdr.de

Dr. Jürgen Lindner  
j.lindner@hzdr.de

# Erneut in die Fabrik statt auf den Abfall

Beim Müll soll die Entwicklung in Richtung Kreislaufwirtschaft gehen: Gemäß diesem Ideal sollen alle Materialien, aus denen ein Produkt besteht, am Ende seiner Lebensdauer wiederverwertet werden. Aber es gibt noch viel zu tun, bis man so weit ist. Wie Untersuchungen zeigen, wären bei Elektronikschrott eine modulare Bauweise und geschickte Sortierung hilfreich, um kostbare Metalle zu recyceln.

Text . Sven Titz

Ein Smartphone besitzt heutzutage fast jeder. Viele kaufen alle zwei bis drei Jahre ein neues. Oft liegt das alte dann noch jahrelang in der Schublade. Und wohin damit? Obwohl wertvolle Materialien in den Geräten stecken, vor allem seltene Metalle, werden viele Smartphones nur unzureichend recycelt. Manche landen gar illegaler Weise im Hausmüll. Eigentlich wird in Deutschland eine Kreislaufwirtschaft angestrebt. Doch 2014 lag der Recycling-Anteil der eingesetzten Materialmenge erst bei 17 Prozent. Ähnlich beim Elektronikschrott, zu dem Tablets, Laptops, PCs ebenso wie zahlreiche weitere Geräte aus unserem Alltag zählen: Von dem Ideal eines Stoffkreislaufs ist man noch sehr weit entfernt.

Ein Forschungsprojekt zu Smartphones zeigt exemplarisch die Chancen, aber auch die Grenzen der Kreislaufwirtschaft bei Elektronikgeräten. Geleitet hat es Markus Reuter, Direktor

am Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie. Zusammen mit seiner Kollegin Antoinette van Schaik von der niederländischen Einrichtung MARAS B.V. hat er die Recyclingfähigkeit des „Fairphone-2“ getestet. Dieses Modell der Firma „Fairphone“ ist speziell im Sinne einer transparenten Herstellung und für die Wiederverwertbarkeit konstruiert worden. Dazu haben es die Entwickler aus sieben Modulen aufgebaut.

2016 kam die Firma auf van Schaik und Reuter zu, weil sie sich für deren Simulationssoftware interessierte. Die kann nämlich die kompletten Pfade der Rohstoffe simulieren – inklusive Recycling-Prozess. Die Software findet für verschiedene Recycling-Methoden heraus, wie viel von welcher Substanz wiedergewonnen werden kann.

## Modulare Bauweise optimal fürs Recycling

In der Studie haben die Forscher drei Recyclingwege getestet: Bei dem ersten wurde das Fairphone-2 eingeschmolzen, beim zweiten in seine Module zerlegt und beim dritten zerschreddert. „Das Recycling per Modulmethode schnitt am besten ab, wenn man insgesamt betrachtet die Verluste minimieren möchte“, fasst Markus Reuter die Ergebnisse zusammen. „Substanzen wie Gold, Kupfer, Silber, Kobalt, Nickel, Palladium, Platin, Gallium, Indium und Zink können demnach zum größten Teil wiederverwertet werden. Doch auch bei der Zerlegungsvariante ist die Wiedergewinnung vieler Substanzen limitiert – das gilt zum Beispiel für die Metalle Tantal und Wolfram.“

Die Crux bei Elektronikgeräten wie den Smartphones ist die enorm enge, chemische wie physikalische Verbindung der Rohstoffe. „Viele Teile sind miteinander verklebt, manche Substanzen werden aufgedampft, andere per Elektrolyse verbunden, wieder andere sind Legierungen“, erklärt Reuter. Das erschwert das Recycling enorm. Und selbst was technisch möglich ist, hat nicht immer Sinn. Bei manchen Metallen ist die Konzentration schlicht zu gering, als dass sich ein Recycling lohnen würde.

In derselben Studie wurde auch die Umweltwirkung der Recyclingmethoden für das Fairphone-2 getestet. Bewertet wurden neben der Materialverschwendung der Energiebedarf, die Klimabelastung und die Behandlung von Plastik, das wiederverwertet oder verbrannt werden kann. Bei diesem Test siegte ebenfalls die modulare Methode. Sie geht insofern als klare Empfehlung aus der Studie hervor.

Die Geschichte mit dem Fairphone-2 sei schon eine „super Sache“, sagt Christiane Schnepel, die das Fachgebiet Pro-

duktverantwortung im Umweltbundesamt (UBA) in Dessau leitet. Dabei werde die gesamte Lieferantenkette unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit berücksichtigt, lobt die Ingenieurin. Schnepel gibt aber zu bedenken, dass man neben den Smartphones all die anderen Elektronikgeräte nicht vergessen dürfe, bei denen ähnliche Edel- und Sondermetalle verbaut sind.

## Die Tücken der Müll-Sortierung

Werden die Geräte zu Abfall, muss generell die Frage beantwortet werden, wie mit derartigem Schrott hinsichtlich der Entsorgung verfahren werden soll. Dies regelt in Deutschland das Elektro- und Elektronikgerätegesetz, kurz „ElektroG“. Es ist dazu da, die Umwelt vor Schadstoffen zu schützen, die in den Geräten stecken. Außerdem soll das Gesetz gewährleisten, dass möglichst viele Ressourcen wiedergewonnen werden. Das ElektroG schreibt zum Beispiel vor, dass Händler ab einer bestimmten Geschäftsgröße verpflichtet sind, kleine Altgeräte zurückzunehmen, um sie dem Recycling zuzuführen. Damit die jeweils beauftragten Entsorger mit den Elektroaltgeräten vernünftig umgehen, ist für das ElektroG eine neue „Behandlungsverordnung“ geplant. Das UBA hat dafür seit November 2015 in einem offenen Prozess – gemeinsam mit 200 Beteiligten aus Unternehmen, Instituten, Umweltverbänden und Behörden – eine Reihe von Empfehlungen erarbeitet, berichtet Schnepel. Dabei kristallisieren sich schon einige typische Anliegen heraus. Eines betrifft die sinnvolle Sortierung und Schadstoff-Entfrachtung des Schrotts.

So geht es in einer Empfehlung um Photovoltaik-Module. Diese sollen zunächst von Bauabfällen getrennt und bruchstark erfasst werden, um sie dann der Entsorgung zuzuführen. Manche Photovoltaik-Paneele sind mit giftigem Cadmium-Tellurid beschichtet. Daraus ergeben sich für den Entsorgungsprozess spezifische Anforderungen. ➤

Quelle: Lya\_Cattel / istock



Eine andere Empfehlung betrifft Leiterplatten in Elektronikgeräten. In Festplatten, Routern, Handys oder Computern sind relativ viele Edel- und Sondermetalle auf den Leiterplatten konzentriert. Diese Metalle lassen sich am besten zurückgewinnen, wenn die Leiterplatten vor Zerkleinerung der Geräte ausgebaut werden. Dann kann diese abgetrennte „Fraktion“ aus Leiterplatten in spezifischen metallurgischen Prozessen zur Rückgewinnung aufbereitet werden. Auf diese Weise erhält man die wertvollen Metalle zurück. Werden die Geräte dagegen als Ganzes, zum Beispiel in Schredderanlagen, zerkleinert, geraten die Edel- und Sondermetalle auch in den Kunststoffanteil. Dadurch gehen sie für eine Rückgewinnung verloren.

### Rare Metalle im Elektronikschrott

Die Kreislaufwirtschaft wird nicht allein aus Gründen des Umweltschutzes angestrebt. Ein weiteres Motiv besteht in dem Wunsch, effizient mit Ressourcen umzugehen. Langfristig sollen Wirtschaftswachstum und Rohstoffeinsatz entkoppelt werden. Die Regierung hat darum im vergangenen Jahr das „Deutsche Ressourceneffizienzprogramm“ bis 2020 fortgeschrieben. Auch auf EU-Ebene wird versucht, die Abhängigkeit vom Import kritischer Metalle zu verringern.

Schon lange gehört die Vorstellung, man könne Metalle einzig und allein aus Erzen gewinnen, der Vergangenheit an. Zwei Vergleiche demonstrieren, wie groß das Potential der Wiederverwertung ist: Der gesamte Müll eines Jahres in Deutschland enthält mehr Kupfer, als die größte Kupfermine weltweit fördert. Und in einer Tonne Handys steckt ungefähr 50 Mal so viel Gold wie in einer Tonne goldhaltigen Erzes.

Kobalt, Lithium, Indium, Gallium und Metalle der Seltenen Erden, wie etwa Neodym, zählen zu den Substanzen, über die im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft seit Jahren besonders intensiv nachgedacht wird. Der Bedarf an ihnen nimmt nicht zuletzt wegen der Energiewende zu, da nun viele Anlagen zur Stromgewinnung aus erneuerbaren Quellen gebaut werden müssen. Doch in vielen Fällen gibt es noch keine geeigneten oder rentablen Verfahren, um die genannten Substanzen aus dem Schrott herauszuholen.

Lithium zum Beispiel steckt in den Akkus vieler Geräte. Mit dem Aufkommen der Elektromobilität dürfte der Bedarf an Lithium noch einmal steigen. Zwei Drittel der Ressourcen dieses Metalls befinden sich in Chile und Bolivien. Sie könnten in absehbarer Zukunft erschöpft sein. Darum wäre es hilfreich, wenn sich das Lithium, das in den Akkus steckt, recyceln ließe. Das war bisher aufwendig und teuer. Doch Forscher an der TU Bergakademie Freiberg scheinen kürzlich mithilfe eines neuen Verfahrens einen Weg gefunden zu haben, der in Zukunft zu akzeptablen Preisen die Wiedergewinnung von Lithium aus den Akkus gestatten könnte.

Die Versorgung mit dem Metall Kobalt, das oft für die Kathoden der Akkus verwendet wird, scheint allerdings noch deutlich kritischer zu sein. Das geht aus einer neuen Analyse der Lieferketten für Lithium-Ionen-Akkus durch Forscher am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) hervor. Kobalt wird derzeit größtenteils in der Republik Kongo

gewonnen. Immerhin aber gibt es für dieses Metall bereits kommerziell lohnende Recycling-Verfahren.

Bereits an diesen wenigen Beispielen wird deutlich: Die Herausforderung, zu einer echten Kreislaufwirtschaft überzugehen, ist groß und komplex – gerade bei Elektronikschrott. Markus Reuter wünscht sich deshalb, das Potential der Kreislaufwirtschaft realistischer einzuschätzen. Ein Smartphone vergleicht er gern mit einer Tasse gesüßten Milchkaffee: „Die lässt sich auch nicht auf ökonomische Weise einfach wieder in Kaffeemehl, Wasser, Milch und Zucker zurückverwandeln. Zu hundert Prozent wird sich das Material komplexer Geräte prinzipiell nie recyceln lassen. Besser als bisher geht es aber auf jeden Fall.“

### Publikationen:

Fairphone's report on recyclability – does modularity contribute to better recovery of materials (<https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2017/02/FairphoneRecyclability-Report022017.pdf>), 2017

A. van Schaik, M.A. Reuter: Recycling indices visualizing the performance of the circular economy, World of Metallurgy – Erzmetall, 2017

M.A. Reuter, A. van Schaik, J. Gediga: Simulation-based design for resource efficiency of metal production and recycling systems: Cases – copper production and recycling, e-waste (LED lamps) and nickel pig iron, International Journal of Life Cycle Assessment, 2015 (DOI 10.1007/s11367-015-0860-4) 

 [www.fairphone.com/de/](http://www.fairphone.com/de/)

### Kontakt

\_Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie am HZDR  
Prof. Markus Reuter  
[m.reuter@hzdr.de](mailto:m.reuter@hzdr.de)

\_Material Recycling and Sustainability (MARAS) B.V.  
Dr. Antoinette van Schaik  
[a.vanschaik@maras-bv.nl](mailto:a.vanschaik@maras-bv.nl)



 Elizabeth Green nimmt am Hochfeld-Magnetlabor spezielle Magnete unter die Lupe. Quelle: S. Floss 

# Wenn Magnete die Frustration packt

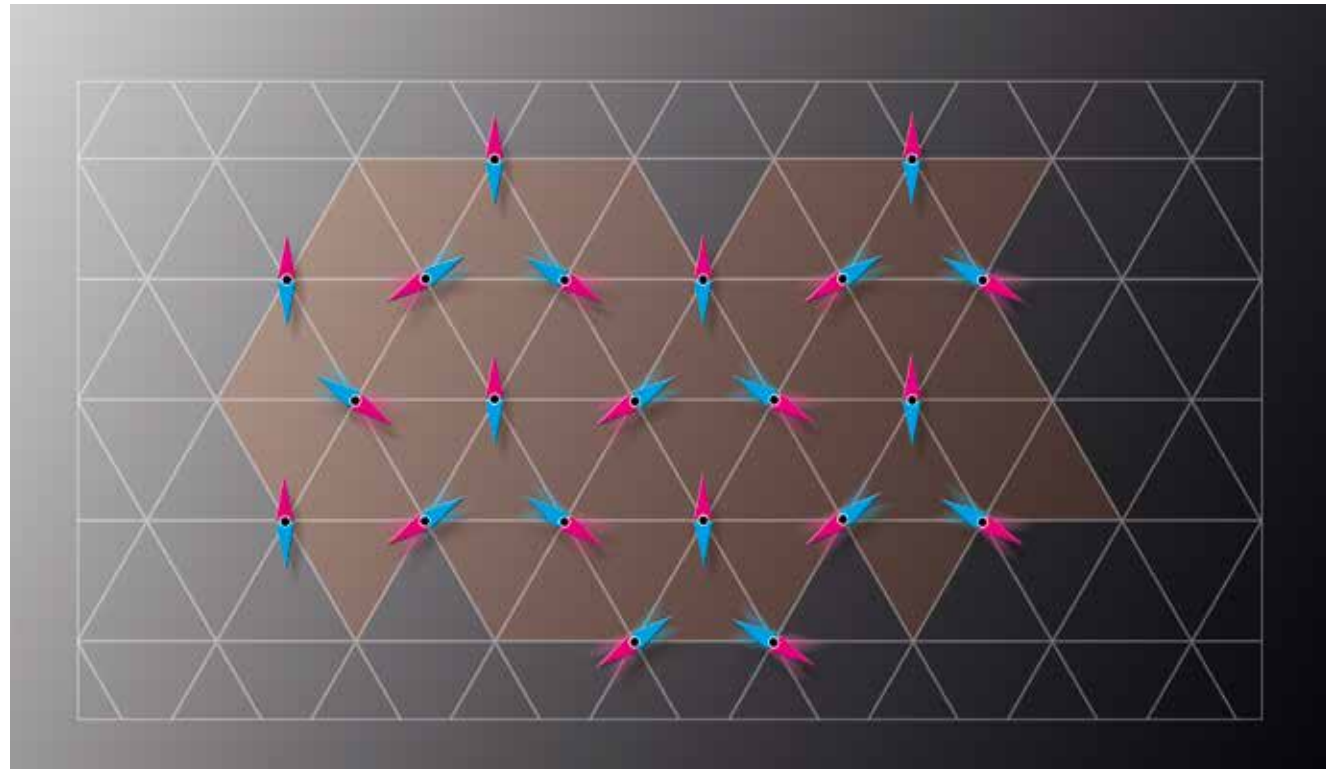
Das Hochfeld-Magnetlabor Dresden erzeugt extrem starke Magnetfelder. Damit können Wissenschaftler neuartige Zustände in einer ungewöhnlichen Materialklasse hervorrufen – den frustrierten Magneten. Das Ergebnis: neues Grundlagenwissen über das Verhalten von Festkörpern.

\_Text . Frank Grotelüschen

Der Metallzylinder besitzt den Durchmesser einer Waschmaschinen­trommel, Boden und Deckel sind mit massiven Muttern verschraubt. Der Klotz liegt im Flur des Hochfeld-Magnetlabors Dresden und fungiert als Exponat. „Es ist eine aus­rangierte Magnetspule“, erklärt Sergei Zherlitsyn, Physiker am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. „Mit solchen Spulen erzeugen wir Magnetfelder, die zu den stärksten der Welt gehören.“ Mit diesen Feldern traktieren die Forscher bestimmte Materialien und beobachten dadurch Hinweise

für neue, exotische Materialzustände – Phasen, deren innere Ordnung einem Flüssigkristall ähnelt oder die Anzeichen eines seltsamen Quantenzustands zeigen, der Suprasolidität.

Konkret befassen sich die HZDR-Experten mit der Material­klasse der frustrierten Magneten. Das Innenleben eines gewöhnlichen Magneten kann man sich vorstellen wie ein Areal aus zahllosen Kompassnadeln, die sich oft gegenseitig ausrichten und dadurch eine relativ strickte Ordnung einneh- 



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

men: Entweder zeigen in einfachen Magneten die Kompassnadeln - von Physikern als Spins bezeichnet - in die gleiche oder in die gegenläufige Richtung.

Anders bei einem frustrierten Magneten: „Bei bestimmten Kristallgittern reagieren drei Spins aufeinander“, erläutert die Physikerin Elizabeth Green. „Zwei davon können sich gegenseitig ausrichten und zeigen in eine jeweils gegenläufige Richtung. Der dritte jedoch weiß nicht so recht, wie er sich orientieren soll - und ist deshalb frustriert.“ Bildlich gesprochen entspricht das drei Menschen, von denen zwei genau wissen, auf welchen Platz sie sollen - wogegen dem dritten unklar ist, nach welchem von den beiden anderen er sich richten soll. Infolgedessen ist er orientierungslos und dadurch frustriert.

Das Besondere an dieser Stoffklasse: „In frustrierten Magneten können neue, einzigartige Materiezustände auftauchen“, erläutert Sergei Zherlitsyn. „Allerdings zeigen sich diese Zustände oft erst, wenn man die Proben extremen Bedingungen aussetzt, und zwar starken Magnetfeldern, tiefen Temperaturen oder einem hohen Druck.“ Solche Bedingungen lassen sich am Hochfeld-Magnetlabor Dresden (HLD), einer Nutzereinrichtung des HZDR, erzeugen. Es vermag Magnetfeldpulse mit Feldstärken von mehr als 95 Tesla zu erzeugen, ein Zweimillionenfaches des Erdmagnetfelds.

### Superspulen mit Stützkorsett

Dazu mussten zunächst spezielle Spulen konstruiert werden: Ein Rohr, in dem der Versuchsaufbau steckt, ist mit mehreren Lagen Metalldraht umwickelt. Durch diese Drähte fließen Ströme von bis zu 60.000 Ampere, wodurch die extrem starken Magnetfelder entstehen. Da sie die Spule auseinanderzureißen drohen, ist die Drahtwicklung durch ein korsettähnliches Fasergeflecht stabilisiert. Es hält dem 40.000-Fachen des Atmosphärendrucks stand. Allerdings lässt sich dieser Extremzustand nur für Sekundenbruchteile aufrechterhalten - das Magnetfeld ist nicht von Dauer, sondern gepulst. Die kurzen Strompulse, die die Spule speisen, kommen von einer Kondensatorbank, untergebracht in einem turnhallengroßen Raum. „Wir haben zwei dieser Kondensatorbänke, es sind die weltweit größten ihrer Art“, erklärt Sergei Zherlitsyn und zeigt auf Metallgestelle voller massiver Elektrotechnik, insgesamt sind es 500 ölgefüllte Einzelkondensatoren.

Rund eineinhalb Minuten brauchen sie, bis sie voller Energie sind. Dann, ferngesteuert aus einem Kontrollraum, werden sie schlagartig entladen und schicken einen heftigen Strompuls zu einem der zehn Versuchstände. Dort steckt die zylinderförmige Magnetspule in einer Grube mit dicken Betonwänden. Diverse Kabel und Leitungen führen zum Magneten und sorgen für Stickstoff-Kühlung, Stromzufuhr und die Verbindung zu diversen Messfühlern. Ein Puls dauert zwar nur Sekundenbruchteile, bedarf aber einer stundenlangen Vorbereitung. Nach dem Puls können die Forscher auf den Kontrollraum-Bildschirmen sofort prüfen, ob die Messdaten-Aufnahme wie gewünscht geklappt hat.

„Während des Experiments ist es verboten, sich im Versuchstand aufzuhalten“, sagt Zherlitsyn. „Denn wir belasten unsere Magneten bis an die Grenzen ihrer Festigkeit - und manchmal darüber hinaus.“ Davon zeugen die Trümmerteile eines zerborstenen Magneten, die im kleinen Ausstellungsbereich des Hochfeld-Magnetlabors zu sehen sind. „Ab und zu versagen die Magneten und bersten bei einem Experiment“, erzählt der Physiker. „Sie werden bei den Versuchen stark beansprucht und haben deswegen nur eine beschränkte Haltbarkeit - weshalb wir in unseren Werkstätten regelmäßig neue Magneten bauen.“

Mit solchen Versuchen gelang Zherlitsyn vor einiger Zeit gemeinsam mit Forschern aus Augsburg und dem moldawischen Chişinău eine bemerkenswerte Entdeckung. Dabei ging es um ein sonderbares Quantenphänomen, die sogenannte Suprasolidität. Ein Material zeigt in diesem Fall sowohl feste als auch suprafluide Eigenschaften. Bei der Suprafluidität können Flüssigkeiten ohne jeden Widerstand an den Wänden von Gefäßen hochkriechen - vorausgesetzt, sie sind ultrakalt.

Suprasolidität wurde bei extrem tiefen Temperaturen in festem Helium vermutet. Dabei sollten leere Stellen im Kristallgitter, die normalerweise von Helium-Atomen besetzt sind, ohne jeden Widerstand durch den Kristall geistern können - als hätte man eine Substanz vor sich, die zugleich fest und flüssig ist. Ein paradoxer Effekt, für dessen Existenz es bereits einige experimentelle Indizien gibt. So konnten in diesem Jahr gleich zwei Arbeitsgruppen in einer extrem kalten Atomwolke, einem sogenannten Bose-Einstein-Kondensat, starke Anzeichen für das Auftreten von Suprasolidität beobachten.

### Fest und flüssig zugleich

Einen weiteren Hinweis hat nun das Team von Sergei Zherlitsyn geliefert - und zwar mit Hilfe der HLD-Experimente mit frustrierten Magneten. „In einer Verbindung aus Mangan, Chrom und Schwefel haben wir ähnliche Eigenschaften wie bei der Suprasolidität beobachten können“, erklärt der Physiker. „Bei uns sind es jedoch keine Teilchen, die sich bewegen, sondern die Spins von Elektronen.“ Formal wird beides durch

dieselbe Theorie beschrieben. Da die Spins ein suprasolides Verhalten zeigen, untermauern sie die Beweislage, dass es dieses seltsame Quantenphänomen tatsächlich gibt.

Ähnlich verblüffend ist auch das Ergebnis einer Arbeitsgruppe um Elizabeth Green, an der neben Experten aus Dresden auch Fachleute aus Stuttgart, Grenoble und Toulouse beteiligt waren. „In einer Verbindung aus Lithium, Kupfer, Vanadium und Sauerstoff haben wir Hinweise darauf gefunden, dass die Spins bei hohen Magnetfeldern eine Ordnung annehmen, die der Struktur von Flüssigkristallen ähnelt“, beschreibt Green. Das Faszinierende: Anders als konventionelle Magneten besitzen diese Materialien lediglich in einer Raumrichtung eine magnetische Ordnung, in den anderen nicht. Zwar haben die Versuche vielversprechende Indizien für das Vorhandensein einer solchen „nematischen Phase“ geliefert. Für den definitiven Beweis aber bräuchte es noch weitere Experimente.

Und was lässt sich mit den Erkenntnissen praktisch anfangen? „Bislang ist das reine Grundlagenforschung“, antwortet Green. „Noch wissen wir nicht, ob sie eines Tages zu konkreten Anwendungen führen können.“ Immerhin: Manche Experten spekulieren bereits, dass die frustrierten Magneten mit ihren exotischen Zuständen als Basis für einen revolutionären Rechartyp dienen könnten - den Quantencomputer. Der nämlich wäre, könnte man ihn tatsächlich bauen, selbst den besten Superrechnern in vielerlei Hinsicht haushoch überlegen.

### Publikationen:

V. Tsurkan, S. Zherlitsyn, L. Prodan, V. Felea, P.T. Cong, Y. Skourski, Z. Wang, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, J. Wosnitza, A. Loidl: Ultra-robust high-field magnetization plateau and supersolidity in bond-frustrated  $\text{MnCr}_2\text{S}_4$ , Science Advances, 2017 (DOI: 10.1126/sciadv.1601982)

A. Orlova, E. L. Green, J. M. Law, D. I. Gorbunov, G. Chanda, S. Krämer, M. Horvatić, R. K. Kremer, J. Wosnitza, G. L. J. A. Rikken: Nuclear magnetic resonance signature of the spin-nematic phase in  $\text{LiCuVO}_4$ , Physical Review Letters, 2017 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.247201)



Sergei Zherlitsyn (rechts) hat die HZDR-Rekordspulen mitentwickelt. Mit Hilfe einer speziellen Maschine können der Physiker und sein Mitarbeiter Oliver Kersten (links) die Spulen wickeln. Quelle: J. Jeibmann

### Kontakt

\_Hochfeld-Magnetlabor Dresden am HZDR  
Dr. Sergei Zherlitsyn  
s.zherlitsyn@hzdr.de

Dr. Elizabeth Green  
e.green@hzdr.de

# Farben scheiden die Geschlechter

Über die Wahrnehmung von Farben lässt sich bekanntlich gut streiten. Nigerianische und Leipziger Forscher konnten nun herausfinden, dass männliche und weibliche Mäuse Blau jeweils in anderen Gehirnhälften verarbeiten – genau im Gegensatz zu Menschen.

Text . Roland Knauer



Quelle: Deagreez / istock

Anfangs konnte Philip Njemanze vom Chidicon Medical Center in der nigerianischen Großstadt Owerri das Ergebnis kaum glauben. Der Gehirnforscher und Neurochirurg hatte in seiner Heimat mit speziellen Ultraschall-Untersuchungen beobachtet, dass Männer blaues Licht auf der rechten Seite ihres Gehirns wahrnehmen, während Frauen dafür die linke Hälfte nutzen. Um diese erstaunlichen Ergebnisse genauer zu untersuchen, diskutierte sie der afrikanische Forscher mit den HZDR-Experten Peter Brust und Mathias Kranz vom Institut für Radiopharmazeutische Krebsforschung, da sie solche Unterschiede mit ihren Methoden an der Leipziger Forschungsstelle viel detaillierter studieren können. Nachdem sie ein vergleichbares Protokoll zur Farbwahrnehmung bei Mäusen getestet hatten, lieferten die Resultate die nächste Überraschung: Zwar verarbeiten die Geschlechter bei diesen Nagetieren blaues Licht ebenfalls in unterschiedlichen Hirnhälften, nur schienen die Seiten im Vergleich zu uns Menschen vertauscht zu sein.

Was war passiert? Zunächst vermutete Philip Njemanze einen Messfehler. „Er fragte mich, ob ich vielleicht beim Auswerten der Daten etwas vertauscht haben könnte“, erinnert sich Mathias Kranz, der das Experiment durchgeführt hatte. Antworten auf solche Fragen gehören zum Alltag eines Naturwissenschaftlers und der Medizin-Physiker begab sich auf Fehlersuche. Fündig wurde er nicht: Nichts war vertauscht, alles war richtig analysiert. Damit aber liegt eine Erklärung auf der Hand: Offensichtlich verarbeiten Mäuse blaue Farben in einer anderen Hirnhälfte als wir Menschen. Es gibt also nicht nur Unterschiede zwischen den Geschlechtern beim Wahrnehmen von Farben, sondern auch noch zwischen den Arten.

## Neue Methoden entschlüsseln die Farbwahrnehmung

Noch rätseln Sinnesphysiologen überall auf der Welt, wie solche Unterschiede entstehen und welche Folgen sie haben können. Schließlich ist das Farbsehen bei uns Menschen zwar recht gut untersucht, im Tierreich gibt es dagegen noch erhebliche Wissenslücken. Sinneswahrnehmungen bestehen aus zwei großen Schritten: Da ist einmal der Empfang des Signals selbst und zum zweiten die Verarbeitung dieser Reize im Gehirn, die sich nur an lebenden Organismen untersuchen lassen.

Im Auge eines Menschen befinden sich zum Beispiel winzige Strukturen, die sogenannten Stäbchen, die fürs Schwarz-Weiß-Sehen inklusive der Grautöne zuständig sind. Daneben gibt es in unseren Augen noch drei unterschiedliche Typen von Zapfen. Einer von ihnen ist besonders empfindlich für sichtbares blaues Licht mit relativ kurzer Wellenlänge, ein zweiter reagiert am besten auf Grün mit mittlerer Wellenlänge, während der dritte für das langwellige Rotlicht zuständig ist. Solche Zapfen gibt es auch in den Augen vieler Tiere. Allerdings beschränken sich viele Säugetiere, wie die Mäuse, auf zwei unterschiedliche Zapfen-Typen, während Vögel und Reptilien häufig sogar vier verschiedene haben.

Alle diese Empfänger aber liefern zunächst einmal nur Signale, die anschließend in einem zweiten Schritt im Gehirn zum Farbsehen verarbeitet werden. Diese Vorgänge in den Zellen eines lebenden Menschen oder Tieres können die Forscher nur mit raffinierten Verfahren beobachten, von denen viele erst in den letzten Jahrzehnten entwickelt wurden.

## Der verräterische Energieverbrauch der Zellen

Eine davon ist die Doppler-Ultraschall-Methode, mit der Philip Njemanze die Farbwahrnehmung seiner Studenten in Nigeria untersucht hat. Damit misst der Forscher, wieviel Blut in bestimmten Bereichen des Gehirns durch die Adern fließt. Blut wiederum versorgt das Gewebe mit Energie. Fließt also in einem bestimmten Bereich des Gehirns mehr Blut, wird dort sehr wahrscheinlich mehr Energie verbraucht, weil die Zellen dort stärker als andernorts beschäftigt sind. Bei den männlichen Studenten aber war die rechte Gehirnhälfte besonders aktiv, wenn sie blaues Licht sahen, bei ihren Kommilitoninnen wird Blau dagegen offensichtlich in der linken Gehirnhälfte verarbeitet.

Besser als das Messen des Blutflusses mit der Doppler-Ultraschall-Methode wäre es aber, den Energieverbrauch der dort arbeitenden Zellen direkt zu messen. Genau das können Peter Brust und Mathias Kranz, indem sie einen kleinen Teil des Zuckers Glucose – und damit des wichtigsten Energielieferanten im Blut – durch eine ähnliche Verbindung namens [<sup>18</sup>F]Fluor-desoxyglucose (FDG) ersetzen, die ein radioaktives Fluor-18-Atom enthält. Der Organismus verwechselt dieses FDG mit der Glucose und versucht es ähnlich wie diesen Zucker zu nutzen. Dabei bleibt aber ein Teil der Substanz mitsamt den Fluor-18-Atomen im Zellinneren hängen.

Die Hälfte dieser radioaktiven Atome zerfällt innerhalb von 109 Minuten und strahlt dabei Positronen ab, die wiederum rasch mit Elektronen in der Umgebung kollidieren. Beide Teilchen wandeln sich dabei in Gammastrahlen um, die von Messgeräten der Forscher registriert werden. Je mehr Gammastrahlen aus einer Region des Gehirns kommen, umso mehr Fluor-18 muss dort hängen geblieben sein und umso mehr Energie wird dort offensichtlich verbraucht. Diese Positronen-Emissions-Tomographie (PET) wird häufig in der Medizin angewendet, um zum Beispiel Erkrankungen des Gehirns und Tumore zu finden.



Quelle: Deagreez / istock

## Mäuse sehen anders

Die Leipziger Forscher verwenden diese Diagnose-Methode zum Beispiel auch bei Mäusen. In Experimenten reicherte sich der radioaktive Zucker bei den männlichen Mäusen deutlich stärker in Teilen der linken Hälfte des Gehirns und damit genau auf der entgegengesetzten Seite wie bei den in Nigeria untersuchten Studenten an. Bei weiblichen Mäusen verbrauchten dagegen Teile der rechten Gehirnhälfte mehr Energie als die linke Seite.

„Es war natürlich eine faustdicke Überraschung, dass die Evolution bei der Wahrnehmung der Farbe Blau bei Mäusen einen ganz anderen Weg als bei uns Menschen eingeschlagen hat“, wundert sich Mathias Kranz. Auf die Frage, weshalb das so ist, zuckt der Forscher nur mit den Schultern: „Das weiß bisher niemand. Unsere Kollegen in Nigeria werden das Thema aber weiter verfolgen.“

## Publikation:

P.C. Njemanze, M. Kranz, M. Amend, J. Hauser, H. Wehrl, P. Brust: Gender differences in cerebral metabolism for color processing in mice: A PET/MRI study, PLOS ONE, 2017 (DOI: 10.1371/journal.pone.0179919) ┘

## Kontakt

„Institut für Radiopharmazeutische Krebsforschung –  
Forschungsstelle Leipzig  
Prof. Peter Brust  
p.brust@hzdr.de

Dr. Mathias Kranz  
m.kranz@hzdr.de

# Ganz unten im Periodensystem

Jeden Frühling warten zahlreiche Nachwuchswissenschaftler auf eine Nachricht des Europäischen Forschungsrates (ERC, European Research Council): Es geht um die Vergabe der begehrten ERC Starting Grants, die aussichtsreiche Forscher mit bis zu 1,5 Millionen Euro unterstützen. Zu den wenigen Auserwählten gehörte in diesem Jahr Kristina Kvashnina. Die Physikerin untersucht an der Rossendorf Beamline ROBL, die das HZDR am Europäischen Synchrotron in Grenoble betreibt, Elemente, die sich am unteren Ende des Periodensystems befinden. *entdeckt* hat sich mit ihr über das Projekt unterhalten.

Text . Simon Schmitt

## ERC Starting Grants – die Förderung für vielversprechende Nachwuchsforscher

Mit den ERC Starting Grants zeichnet der Europäische Forschungsrat hervorragende Wissenschaftler aus, um sie am Beginn einer eigenständigen Karriere zu unterstützen. Als Bewertungsgrundlage dienen, abhängig vom Forschungsfeld und dem Karrierezeitpunkt, neben dem vorgeschlagenen Projekt Publikationen, Patente, Vorträge auf internationalen Konferenzen sowie Wissenschaftspreise. Die Europäische Union stellt die Finanzmittel für die ERC-Grants über das EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation „Horizon 2020“ bereit. Von den in diesem Jahr eingereichten 3.085 Anträgen wählte der Forschungsrat insgesamt 406 Projekte aus. Die Förderquote liegt damit bei rund 13 Prozent. Kristina Kvashnina ist nach Markus Schubert und Denys Makarov die dritte HZDR-Wissenschaftlerin, die sich einen ERC Starting Grant sichern konnte.

Quelle: ESRF / Molyneux

**entdeckt: Frau Kvashnina, Ihre Forschung dreht sich vor allem um die Elemente, die zu den sogenannten Lanthaniden und Actiniden zählen. Das umfasst zum Beispiel Uran, Plutonium, aber auch einen Teil der Seltenen Erden. Das letzte Element dieser beiden Gruppen wurde ja bereits 1961 gefunden. Gibt es denn hier überhaupt noch etwas zu erkunden?**

**Kristina Kvashnina:** Tatsächlich noch eine ganze Menge. Viele fundamentale Eigenschaften dieser Elemente verstehen wir noch nicht komplett. Dazu gehört zum Beispiel die Art, wie sie chemische Bindungen eingehen. Das ist gerade im Hinblick auf die langfristige, sichere Lagerung radioaktiven Abfalls ein großes Problem. Wir wissen nicht genau genug, wie sich die radioaktiven Stoffe in den Endlagern verhalten werden. Wenn wir allerdings ihre grundlegenden Strukturen kennen, können wir viel bessere Vorhersagen treffen.

### Warum fehlen hier noch so viele Kenntnisse?

Obwohl das Thema sehr wichtig ist, ist die Wissenschafts-Community in diesem Forschungsbereich trotzdem eher klein. Das liegt vor allem auch daran, weil die meisten Einrichtungen gar nicht die nötigen Experimente durchführen können. Nicht jedes Labor darf mit den radioaktiven Actiniden arbeiten. Unsere Proben präparieren wir daher am HZDR, das als eine der wenigen Einrichtungen in Europa mit den höheren Konzentrationen an Radionukliden umgehen darf. Die Untersuchungen selbst sind wiederum nur an ROBL möglich. Durch die internationale Kooperation haben wir somit eine fast einzigartige Position für unsere Untersuchungen. Das war auch der Grund, warum ich vor zwei Jahren innerhalb der ESRF von einer anderen Beamline zu ROBL gewechselt bin.

### Welche Rolle spielen dabei die Lanthaniden?

Die Lanthaniden ähneln den Actiniden, sind im Gegensatz zu ihnen aber größtenteils nicht radioaktiv. Sie eignen sich deswegen sehr gut als Vergleichssysteme für Simulationen und theoretische Modelle. Manche Elemente dieser Gruppe, wie Praseodym oder Europium, sind aufgrund ihrer Lumineszenz-Eigenschaften aber auch interessant für biomedizinische Anwendungen, weswegen sie in Nanomaterialien verwendet werden. Gerade auf der Nanoebene ändern sich aber die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Stoffe. Das müssen wir genau untersuchen.

### Was passiert bei Ihren Experimenten?

Man kann sich den kompletten Aufbau in etwa wie ein gigantisches Mikroskop vorstellen. Wir setzen die Substanzen hochbrillanter Röntgenstrahlung aus dem Synchrotron aus – also ähnlich wie in einem Krankenhaus, nur ungefähr 100 Milliarden Mal stärker. Und wir wollen nicht den menschlichen Körper durchleuchten, sondern viel tiefer in die Materie eindringen. Uns geht es vor allem um Informationen über die chemische Struktur der Stoffe und um das Verhalten ihrer Elektronen. Um diese Kenntnisse zu erhalten, haben wir gemeinsam mit Partnern aus der Industrie ein neuartiges Röntgenspektrometer entwickelt, das erstmals eine hohe Energieauflösung mit der für Actiniden notwendig niedrigen Nachweisgrenze vereinbart. Derzeit installieren wir die Anlage an ROBL. Das Projekt wird deshalb gerade Doktoranden gute Möglichkeiten bieten, um die Anwendung verschiedener Analysemethoden zu lernen.

### Was umfasst die Förderung der EU?

Über den ERC-Grant erhalte ich in den kommenden fünf Jahren für meine Forschung rund 1,5 Millionen Euro. Damit werde ich meine eigene Arbeitsgruppe mit voraussichtlich drei Post-doc- und zwei Doktorandenstellen an ROBL aufbauen. ┘

### Kontakt

Institut für Ressourcenökologie am HZDR  
Dr. Kristina Kvashnina  
k.kvashnina@hzdr.de  
kristina.kvashnina@esrf.eu

➤ [www.esrf.eu/](http://www.esrf.eu/)

➤ [www.erc.europa.eu/](http://www.erc.europa.eu/)

|                      |                    |                         |                     |                       |                      |                      |                      |                      |                        |                      |                    |                      |                     |                     |
|----------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| 57                   | 58                 | 59                      | 60                  | 61                    | 62                   | 63                   | 64                   | 65                   | 66                     | 67                   | 68                 | 69                   | 70                  | 71                  |
| La                   | Ce                 | Pr                      | Nd                  | Pm                    | Sm                   | Eu                   | Gd                   | Tb                   | Dy                     | Ho                   | Er                 | Tm                   | Yb                  | Lu                  |
| Lanthanum<br>138.906 | Cerium<br>140.115  | Praseodymium<br>140.906 | Neodymium<br>144.24 | Promethium<br>144.913 | Samarium<br>150.36   | Europium<br>151.966  | Gadolinium<br>157.25 | Terbium<br>158.925   | Dysprosium<br>162.50   | Holmium<br>164.930   | Erbium<br>167.26   | Thulium<br>168.934   | Ytterbium<br>173.04 | Lutetium<br>174.967 |
| 89                   | 90                 | 91                      | 92                  | 93                    | 94                   | 95                   | 96                   | 97                   | 98                     | 99                   | 100                | 101                  | 102                 | 103                 |
| Ac                   | Th                 | Pa                      | U                   | Np                    | Pu                   | Am                   | Cm                   | Bk                   | Cf                     | Es                   | Fm                 | Md                   | No                  | Lr                  |
| Actinium<br>227.028  | Thorium<br>232.038 | Protactinium<br>231.036 | Uranium<br>238.029  | Neptunium<br>237.048  | Plutonium<br>244.064 | Americium<br>243.061 | Curium<br>247.070    | Berkelium<br>247.070 | Californium<br>251.080 | Einsteinium<br>[254] | Fermium<br>257.095 | Mendelevium<br>258.1 | Nobelium<br>259.101 | Lawrencium<br>[262] |

Quelle: Vertigo3d / istock

## GESTARTET

# Smarter Nachwuchs für smarte Sensoren

Gemeinsam mit zwölf Forschungseinrichtungen sowie 15 Industrieunternehmen aus neun Ländern hat das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf am 1. September das Europäische Trainingsnetzwerk TOMOCON (Smart Tomographic Sensors for Advanced Industrial Process Control) gegründet. Die Plattform wird insgesamt 15 Nachwuchsforschern die Möglichkeit einer umfassenden Doktorandenausbildung bieten. Inhaltlich geht es um die Entwicklung neuer bildgebender Messverfahren, mit denen sich verfahrenstechnische Prozesse besser steuern und regeln lassen. Dank ultraschneller paralleler Datenverarbeitung könnten sie die Rolle von Sensoren übernehmen, um Industrieanlagen und Maschinen in Echtzeit zu steuern. Die Europäische Union fördert das internationale Netzwerk in den kommenden vier Jahren mit knapp vier Millionen Euro über die Marie-Skłodowska-Curie-Maßnahmen.



© F. Bierstedt

## GETROFFEN

# French Connection

Um ihre wissenschaftliche Zusammenarbeit auf dem Feld der Laser-Teilchenbeschleunigung zu vertiefen, haben das HZDR und das französische Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) Mitte Oktober ein Memorandum of Understanding unterzeichnet. Gemeinsam wollen die Einrichtungen den Einsatz laserbasierter Teilchen- und Strahlenquellen für medizinische Anwendungen, beispielsweise in der Radiobiologie

oder bei der Behandlung von Tumoren, voranbringen. Die Vereinbarung ist zunächst auf fünf Jahre angelegt und soll die Kooperation über gemeinsame Forschungsprojekte sowie den Austausch wissenschaftlichen Personals ausbauen. Die École Polytechnique, die École Nationale Supérieure de Techniques Avancées und das Centre National de la Recherche Scientifique betreiben zusammen das LOA in Paris.



© ESRF / P. Ginter

## GEGRÜNDET

# Große Schritte für die Forschung

Unter dem Namen LEAPS (League of European Accelerator-based Photon Sources) schlossen sich Mitte November 16 Forschungslichtquellen zu einem neuen Konsortium zusammen. Auf diese Weise soll der Austausch gestärkt, der Zugang zu den Anlagen effizienter gestaltet und die technologische Weiterentwicklung beschleunigt werden. Zu den Lichtquellen gehören im Wesentlichen zwei Arten von Anlagen: Synchrotrons und Freie-Elektronen-Laser. Beide Strahlungsquellen ermöglichen wie universelle Supermikroskope neue Einblicke in kleinste Details untersuchter Proben, die auf anderem Weg nicht erreichbar sind.

➤ [www.leaps-initiative.eu](http://www.leaps-initiative.eu)



© H. Lindenknecht

## GEJUBELT

# Im besten Alter

Mit einem Jahresempfang und einem wissenschaftlichen Symposium feierte das Forschungszentrum Mitte Oktober sein 25-jähriges Bestehen. Zahlreiche Vertreter aus Politik, Wirtschaft und Forschung gratulierten zu dem Jubiläum. So hat die sächsische Wissenschaftsministerin, Eva-Maria Stange, in ihrer Rede die gewaltigen Leistungen, die das Forschungszentrum im vergangenen Vierteljahrhundert vollbracht hat, hervorgehoben. Dazu zählen zum Beispiel der Aufbau dreier Großgeräte, die Wissenschaftler aus aller Welt nach Sachsen ziehen, starke internationale Kooperationen, wie mit dem Weizmann Institute of Science in Israel oder dem Europäischen Synchrotron in Grenoble, und viele hochrangige Publikationen. Beim Jahresempfang bedankte sich das HZDR gleichzeitig für die langjährige Arbeit des Kaufmännischen Direktors, Peter Joehnk, der Ende November nach über 15-jähriger Vorstandstätigkeit in den Ruhestand ging.

## GEEHRT

# Exzellent in Forschung ...

Für seine herausragende Abschlussarbeit im Masterstudiengang „Nanotechnologie“, die er am HZDR-Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung angefertigt hatte, zeichnete die Deutsche Physikalische Gesellschaft Toni Hache von der Westsächsischen Hochschule Zwickau Ende November mit dem Georg-Simon-Ohm-Preis aus. Der Nachwuchsforscher hat einen Nano-Mikrowellenoszillator entwickelt, der auf dem Spin-Hall-Effekt basiert. Solche Bauelemente wandeln effizient Gleichströme in Mikrowellenschwingungen um. Aufgrund der Frequenzmodifizierbarkeit, Miniaturisierung und niedrigen Herstellungskosten ergibt sich daraus ein hohes Anwendungspotential in der Kommunikationstechnologie sowie für die Sensorik von Magnetfeldern.

## TERMINVORSCHAU

### Vortragsreihe: HIF Resource Talk

**13.02.2018**

„Recycling von Kobalt und Lithium für die Energiewende“  
Dr. Matthias Buchert | Öko-Institut e.V.

**13.03.2018**

„PV-Technologie ohne den Einsatz kritischer Materialien: Kesterit-basierte Dünnschichtsolarzellen“  
Prof. Susan Schorr | Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH

**09.06.2018 | 10-16.30 Uhr**

Tag des offenen Labors  
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

**11.-13.06.2018**

2. International HeFIB Conference  
Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

**15.06.2018**

Dresdner Lange Nacht der Wissenschaften

**22.06.2018**

Lange Nacht der Wissenschaften in Leipzig

# ... und Ausbildung

Mit 98 von möglichen 100 Punkten hat die Physiklaborantin Stefanie Sonntag ihre Prüfung zur Facharbeiterin abgelegt – sie ist damit die berufsbeste Auszubildende in der gesamten Bundesrepublik. Nachdem Sonntag bereits im Kammerbezirk Dresden und Freistaat Sachsen zur erfolgreichsten Physiklaborantin gekürt worden war, hat sie Anfang Dezember auch der Deutsche Industrie- und Handelskammertag für die herausragende Leistung ausgezeichnet. Das HZDR stellt somit das zweite Jahr in Folge die bundesbeste Azubi in diesem Beruf. Das sächsische Forschungszentrum erhielt außerdem zum 18. Mal hintereinander den Titel „Ausgezeichneter Ausbildungsbetrieb“.

# Neptun im Labor

Im Bruchteil einer Sekunde verwandelt sich die Oberfläche der Plastikprobe in ein brodelndes Gemisch, als der hochintensive Laserblitz auf das Stück trifft. Angeregt davon jagt eine Schockwelle durch das Material, von dem nicht viel übrigbleibt – außer nanometergroßen Diamanten. Aufgrund ihres hohen Härtegrads und ihrer starken Widerstandsfähigkeit nutzen Unternehmen diese ultrakleinen Kostbarkeiten gerne für elektronische Instrumente und medizinische Verfahren, aber auch als Schneidstoffe in der industriellen Fertigung. Bislang werden Nano-Diamanten vor allem aufwendig per gezielter Sprengung hergestellt. Die Produktion mit Lasern könnte ein Verfahren ermöglichen, das sauberer und leichter zu kontrollieren ist.

Wie diese Umwandlung von Plastik in Diamanten aussieht, konnte vor kurzem ein internationales Forscherteam um Dominik Kraus erstmals in Echtzeit beobachten. Am kalifornischen Stanford Linear Accelerator Center haben sie mit der Linac Coherent Light Source – einer der stärksten Röntgenlaserquellen der Welt – Bedingungen nachgestellt, wie sie im Inneren riesiger Eisplaneten vorherrschen: extrem hohe Temperaturen und Drücke. Wie die Experimente gezeigt haben, trennt diese Kombination Verbindungen aus Kohlenwasserstoff, aus denen auch viele Plastikmaterialien aufgebaut sind, auf. Der freigesetzte Kohlenstoff verwandelt sich anschließend in die Nano-Diamanten.

Neben den neuen astrophysikalischen Erkenntnissen über die Zusammensetzung von Exoplaneten konnten die Forscher somit auch Informationen über eine Methode liefern, mit der sich Nano-Diamanten möglicherweise eines Tages besser herstellen lassen.

Quelle: G. Stewart / SLAC National Accelerator Laboratory

## HERAUSGEBER

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

## ERSCHEINUNGSDATUM

Januar 2018  
ISSN: 2194-5705 // Ausgabe 02.2017

## AUTOREN DIESER AUSGABE

Inge Gerdes | Freie Journalistin, Dresden  
Frank Grotelüschen | Freier Wissenschaftsjournalist, Hamburg  
Roland Knauer | Freier Wissenschaftsjournalist, Lehnin  
Marcus Schick | schick\_kommunikation  
Dr. Sven Titz | Freier Wissenschaftsjournalist, Berlin

## KONZEPTION UND REDAKTION

Simon Schmitt (Chefredakteur),  
Dr. Christine Bohnet (v.i.S.d.P.),  
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

## 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 Circlesilk (Umschlag)  
und Circleoffset (Inhalt),  
FSC-zertifiziert und mit dem EU-Ecolabel  
ausgezeichnet

## KONTAKT // BESTELLUNG (kostenfrei)

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf  
Kommunikation und Medien  
Dr. Christine Bohnet  
presse@hzdr.de | +49 351 260-2450

„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](http://www.hzdr.de)

Das HZDR auf Facebook und Twitter.

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

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



# Tag des offenen Labors in Rossendorf

Quelle: O. Killig

# 9.6.

Sa | 10 – 16.30 Uhr

