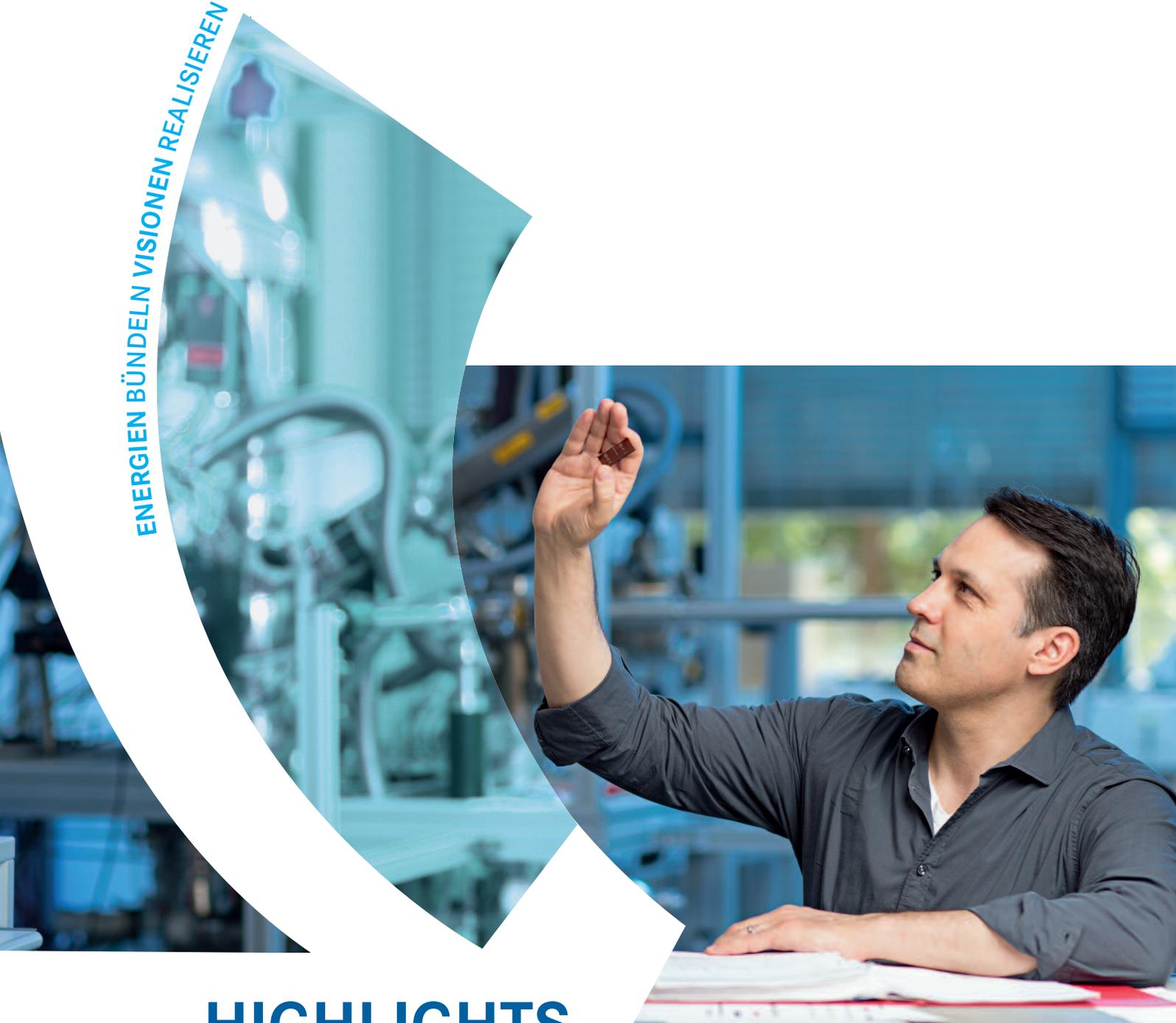
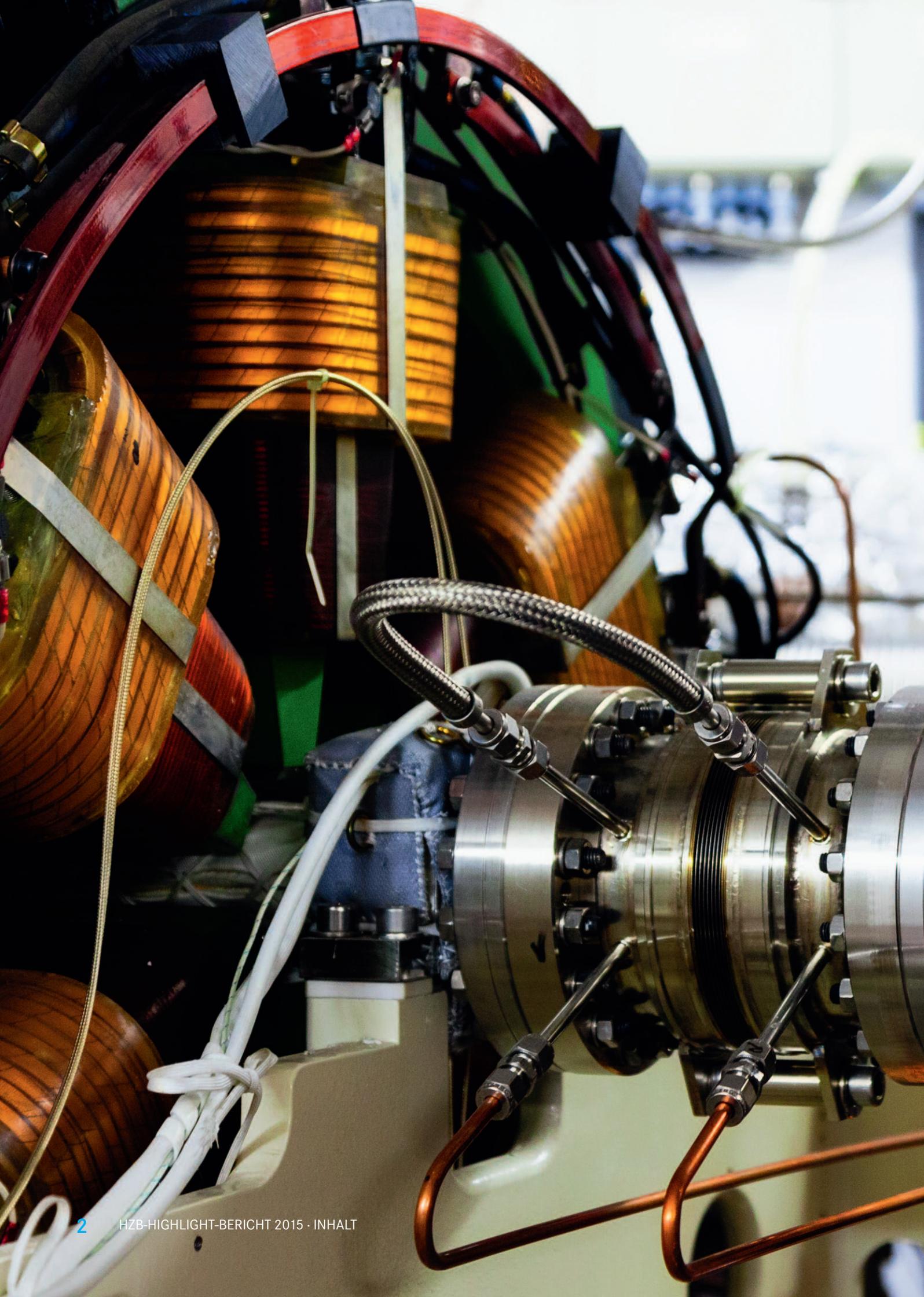


ENERGIEN BÜNDELN VISIONEN REALISIEREN



# HIGHLIGHTS 2015

Höhepunkte aus der Forschung am Helmholtz-Zentrum  
Berlin für Materialien und Energie



## INHALT

<b>Vorwort</b>	<b>04</b>	Ultradünne Wasserfilme zum Fließen gebracht	34
HZB-Strategie 2020+:		Gezielte Pulsauswahl an BESSY II	35
Perspektivkommission unterstützt HZB-Strategie	06		
<b>Energiematerial-Forschung</b>	<b>08</b>	<b>Beschleunigerforschung und -weiterentwicklung</b>	<b>36</b>
Igel und Anti-Igel für den Spinfilter	10	Die Beschleunigerphysik blickt nach Berlin	37
Magnetische Muster dreidimensional auslesen	11	Teure magnetische Störenfriede	38
Neue Materialklasse für die organische Elektronik	12	BESSY II mit zweiter Spur	39
Wie Nanoteilchen Solarzellen effizienter machen	13	<b>Nutzerexperimente</b>	<b>40</b>
Eine Alternative zu Platin in Katalysatoren	14	Experimente mit bis zu 26 Tesla	41
Mischkristalle im Kristall	16	„Teufelstreppe“ in einem Spin-Ventil-System	42
Inhomogene Chlorverteilung	17	Leuchtendes Double	43
Hauchdünne Schichten für mehr Strom	18	Mikro-Batterie im Röntgen-Mikroskop	44
Neues Labor für die Energiematerial-Forschung	20	Wasserstoffspeichern beim Wachsen zugesehen	46
Flüstergalerien für das Licht	21	Was macht Katalysatoren effizient?	47
Tandem-Solarzelle mit Rekordwirkungsgrad	22	Bessere Akkus durch Nanoporen	48
Partner für die industrielle Qualitätssicherung	24	Winzlinge für die Wasserspaltung	49
Unsichtbare Solarmodule in Displays und Fenstern	25	Angriff auf die Achillesferse von HIV	50
Künstliche Photosynthese mit Effizienzrekord	26	Schwertransport im Zellinneren	52
Mikrostrukturen in Polykristallen einfacher darstellen	27	Sandwiches aus Metalloxiden	53
HEMF: Neue Helmholtz-Laborplattform	28	Ein Enzym als Katalysator für Kohlendioxid	54
HZB verstärkt die Katalyseforschung	29	<b>Vermischtes/Anhang</b>	<b>55</b>
<b>Methodenentwicklung für die Forschung mit weicher Röntgenstrahlung</b>	<b>30</b>	Vermischtes	55
Das Innere von Materialien filmen	31	Organigramm des HZB	58
Mit dem Sägezahn zu Tender X-ray	32	Lageplan, Impressum	59

---

## FORSCHUNG AN ENERGIE-MATERIALIEN AM HZB ETABLIERT

Kaum eine Frage ist für unsere Gesellschaft von so fundamentaler Bedeutung wie die sichere und nachhaltige Energieversorgung. Deshalb hat das HZB seine Strategie daran ausgerichtet, zu einem führenden Zentrum der Forschung an Energie-Materialien zu werden. Der Photonenquelle BESSY II kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Ziel des HZB ist deshalb die Weiterentwicklung von BESSY II zu BESSY-VSR, einem einzigartigen Ring mit variabler Pulslänge.

**E**nergie-Materialien sind mehr als nur Solarzellen, mit denen man aus Sonnenlicht elektrischen Strom erzeugt. Das HZB hat eine ganze Reihe von Materialsystemen definiert, die ausgehend von den vorhandenen Kompetenzen das zukünftige Forschungsportfolio des Hauses ausmachen. Solare Brennstoffe, Thermoelektrika oder topologische Isolatoren gehören dazu. Es sind Materialien, die Energie speichern oder umwandeln oder die es erlauben, eine neue und energieeffiziente Informationstechnologie aufzubauen.

Der Fokus der HZB-Forschung liegt dabei immer auf Dünnschichttechnologien. Dabei erweitern wir unser Know-how aus der etablierten Dünnschicht-Photovoltaik und beziehen zusätzlich zu unseren vielfältigen Analysemöglichkeiten insbesondere an den Großgeräten auch die Synthese der Materialien sowie theoretisch abgeleitete Simulationen in unsere Forschung ein. Erfolgreiche Forschungsbeispiele an solchen Materialsystemen präsentieren wir Ihnen in unserem jährlichen Highlight-Bericht ab dieser Ausgabe in neuer Struktur: Die Forschung an Energie-Materialien nimmt dabei einen breiten Raum ein und zeigt, wie vielfältig das HZB auf diesem Gebiet mittlerweile aufgestellt ist.

Weitere Kapitel im Highlight-Bericht – wir haben sichtbar gemacht, zu welchem Programmthema sich die einzelnen Artikel zuordnen lassen – widmen sich der Methodenentwicklung für die Forschung mit weicher Röntgenstrahlung – das sind vor allem Entwicklungen an der Instrumentierung von BESSY II – und der Forschung an Beschleunigertechnologien. Hier finden Sie Informationen zum Voranschreiten unserer Zukunfts-



Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla und Thomas Frederking.

**„Das HZB knüpft seine Forschung an Energie-Materialien eng an die Nutzung und Weiterentwicklung der Photonenquelle BESSY II. Dieses Herangehen haben wir in einem komplexen Strategieprozess herausgearbeitet.“**

projekte BESSY-VSR – dem Ausbau von BESSY zu einem Speicherring mit variabler Pulslänge – und bERLinPro – dem Prototypen eines Linearbeschleunigers mit Energierückgewinnung. Beide Projekte zielen darauf ab, das HZB als Standort für Forschung mit Photonen zukunftsfähig zu erhalten.

Dieser Dreiklang der In-house-Forschung spiegelt wider, dass das HZB seine Energie-Materialforschung eng an die Nutzung und Weiterentwicklung der Photonenquelle BESSY II knüpft. Dieses Herangehen haben wir in einem komplexen Strategieprozess herausgearbeitet. Ihm widmen wir im vorliegenden Highlight-Bericht eine Doppelseite. Lesen Sie auf den Seiten 6 bis 7, wie die HZB-Strategie entstanden ist und was sie konkret beinhaltet.

Selbstverständlich finden in der neuen Struktur des Highlight-Berichts auch die Experimente unserer Nutzer wieder ihren Platz. Anhand der hier vorgestellten Forschungsbeispiele wird klar, dass das Themenspektrum der Nutzer nach wie vor sehr groß und nicht auf das Forschungsfeld Energie-Materialien begrenzt ist. Wir wissen, dass die weiche Röntgenstrahlung, auf deren Erzeugung BESSY II spezialisiert ist, in der Wissenschaftscommunity stark nachgefragt ist. Sie wird daher auch weiterhin vielen Forschungsfeldern zur Verfügung stehen. Das heißt, wenn es um die Auswahl der Strahlzeit-Anträge für BESSY II und BER II geht, entscheidet das Scientific Selection Panel weiterhin nur nach der wissenschaftlichen Qualität der Anträge.

Wir wünschen Ihnen viel Spaß bei der Lektüre unseres Highlight-Berichts 2015 und möchten zugleich Ihre



Prof. Dr. A. Kaysser-Pyzalla  
Wissenschaftliche  
Geschäftsführerin

„Wir wissen, dass die weiche Röntgenstrahlung, auf deren Erzeugung BESSY II spezialisiert ist, in der Wissenschaftscommunity stark nachgefragt ist. Sie wird daher auch weiterhin vielen Forschungsfeldern zur Verfügung stehen.“

Aufmerksamkeit auf die großformatigen Fotos lenken, die die Forschungshighlights illustrieren. Sie sind beim Science Photowalk 2015 entstanden, zu dem das HZB nach 2012 zum zweiten Mal eingeladen hatte. Lesen Sie in unserer Rubrik „Vermischtes“ ab Seite 55 mehr über diese und andere Veranstaltungen am HZB, über Preise und Auszeichnungen, die unsere Forscherinnen und Forscher für ihre herausragenden wissenschaftlichen Arbeiten erhalten haben, über wichtige Berufungen sowie zwei Fellows, die 2015 nach Berlin kamen und nun die Forschung am HZB bereichern.

Wir freuen uns auf Ihre Rückmeldung, wie Ihnen unser neu gegliederter Highlight-Bericht gefallen hat!



Thomas Frederking  
Kaufmännischer  
Geschäftsführer

---

## PERSPEKTIVKOMMISSION UNTERSTÜTZT HZB-STRATEGIE

Das HZB schärft sein Profil. Drängende Fragen der Gesellschaft wie etwa die Energiewende aufgreifend, hat es für sich strategische Handlungsfelder und Ziele identifiziert. Der Schwerpunkt wird in Zukunft auf der **Forschung an Energie-Materialien** liegen. Schlüssel für den Erfolg sind dabei der geplante Ausbau von BESSY II zu einem Speicherring mit variabler Pulslänge und neue Labore für die internationale Forschergemeinschaft in Wannsee.

**F**ür das HZB ist die endgültige Abschaltung des BER II zum 31. Dezember 2019 Herausforderung und Chance, sein Forschungsportfolio strategisch weiterzuentwickeln. Die Handlungsfelder, Ziele und Maßnahmen sind in der HZB-Strategie 2020+ zusammengefasst. Die zukünftigen Aktivitäten des HZB fokussieren sich auf die Forschung mit und für neue Materialien in energierelevanten Systemen sowie auf den Betrieb und die Weiterentwicklung der Photonenquelle BESSY II. Dazu gehört die Entwicklung einer Lichtquelle der nächsten Generation. Beide strategische Zielsetzungen sind auf das Engste miteinander verbunden. Weitere wichtige Schwerpunkte sind die internationale Vernetzung des Zentrums, die Stärkung der Kooperationen mit Universitäten und Hochschulen sowie der Wissens- und Technologietransfer in Wirtschaft und Gesellschaft. Das HZB konzentriert sich auf die Energie-Materialforschung, insbesondere auf funktionale Dünnschichtsysteme. Derartige Systeme sind beispielsweise geeignet, um zukünftig solare Brennstoffe zu erzeugen oder spintronische Bauelemente für energieeffiziente Datenspeicher zu entwickeln. Diese strategische Ausrichtung haben wir in einem längeren Prozess erarbeitet. Zunächst hat die Geschäftsführung offen mit den Forschenden des Zentrums in Arbeitsgruppen und Workshops diskutiert. Fragen waren unter anderem: „In welchen Themen haben wir Alleinstellungsmerkmale? Wer sind unsere Wettbewerber? Wo liegen unsere besonderen

Kompetenzen?“ Die erarbeiteten Ergebnisse flossen im Anschluss in thematisch ausgerichtete Strategiepapiere ein, die wiederum mit den internen und externen Gremien des Zentrums abgestimmt wurden.

### Auf den eigenen Stärken aufbauen

Im Verlauf dieses Strategieprozesses wurden die Stärken des HZB deutlich. In der Energie-Materialforschung besitzt das HZB Schlüsselkompetenzen in der Herstellung und Analyse von Dünnschichtsystemen für Energieanwendungen. Wir forschen dabei an einem breiten Material-Portfolio und entwickeln maßgeschneiderte Systeme und Module. Unsere Schlüsselkompetenzen liegen auch in der Entwicklung und Anwendung einzigartiger *in situ* und *operando* Charakterisierungsmethoden mit vakuumultravioletter (VUV) und weicher Röntgenstrahlung an BESSY II. Der Strategieprozess zeigte auch, dass eine Stärkung des Know-hows in der Materialsynthese notwendig ist. Ein weiteres Ergebnis ist, dass Aktivitäten zur Theorie und Simulation im Bereich der Energie-Materialien ausgebaut werden sollten. Das theoretische Verständnis hilft, grundlegende Prinzipien in den Materialien aufzuklären. Dadurch soll es gelingen, in nachfolgenden Syntheseschritten, unter anderem mithilfe der kombinatorischen Materialsynthese und von Simulationen, maßgeschneiderte Energie-Materialien zu entwickeln. Am Ende dieser Prozesskette stehen das Design und die Entwicklung von Prototypen,

### HERVORRAGENDE PERSPEKTIVEN

Die Gesellschafter des HZB, der Bund und das Land Berlin, haben 2014 eine Perspektivkommission (PK) beauftragt, um die Entwicklung des HZB seit der Fusion von Hahn-Meitner-Institut und BESSY GmbH, die zukünftige strategische Ausrichtung zu bewerten sowie Empfehlungen zu formulieren. Das Einsetzen dieser Perspektivkommission war im Rahmen der Fusion im Jahr 2008 vereinbart worden. Ihr Fazit nach der Begutachtung 2015: Die Perspektivkommission zeigte sich sehr beeindruckt von der Entwicklung des HZB in den sechs Jahren seit seiner Gründung. Sie teilte die Vorstellungen des HZB zu seiner zukünftigen strategischen Ausrichtung und ermutigte das HZB, den eingeschlagenen Weg weiterzugehen: Die enge Kopplung von Energieforschung und BESSY II bietet einmalige Chancen für die Forschung und wird von der PK ausdrücklich befürwortet. Insbesondere die Möglichkeiten für zeitaufgelöste Messungen, die durch die Entwicklung des Speicherrings für variable Pulslängen (BESSY-VSR) entstehen sollen, sind für die Energieforschung hochinteressant.



Der Aufsichtsrat hat den Strategieprozess des HZB unterstützt (v.l.n.r.): Dr. Antje Niemann, Thomas Frederking, Dr. Olaf Schwarzkopf, Prof. Anke Kaysser-Pyzalla, Kerstin Görlitz, Prof. Dr. Uschi Steigenberger, Elsbeth Lesner, Dr. Jutta Koch-Unterseher, Jörn Beckmann, Prof. Beatrix Vierkorn-Rudolph, Prof. Dr. Joachim Treusch, Dr. Karl Eugen Huthmacher, Prof. Dr. Sabine Seidler, Prof. Dr. Peter Fratzl, Prof. Susann Schorr, Dr. Michael Stötzel und Esther Dudzik.

die relevant für die Industrie sind. Für diese Aufgaben stehen dem HZB einzigartige Infrastrukturen zur Verfügung. Unsere Photonenquelle BESSY II ist mit ihrem Schwerpunkt auf VUV und weicher Röntgenstrahlung hervorragend auf die Analytik von Dünnschichtsystemen abgestimmt.

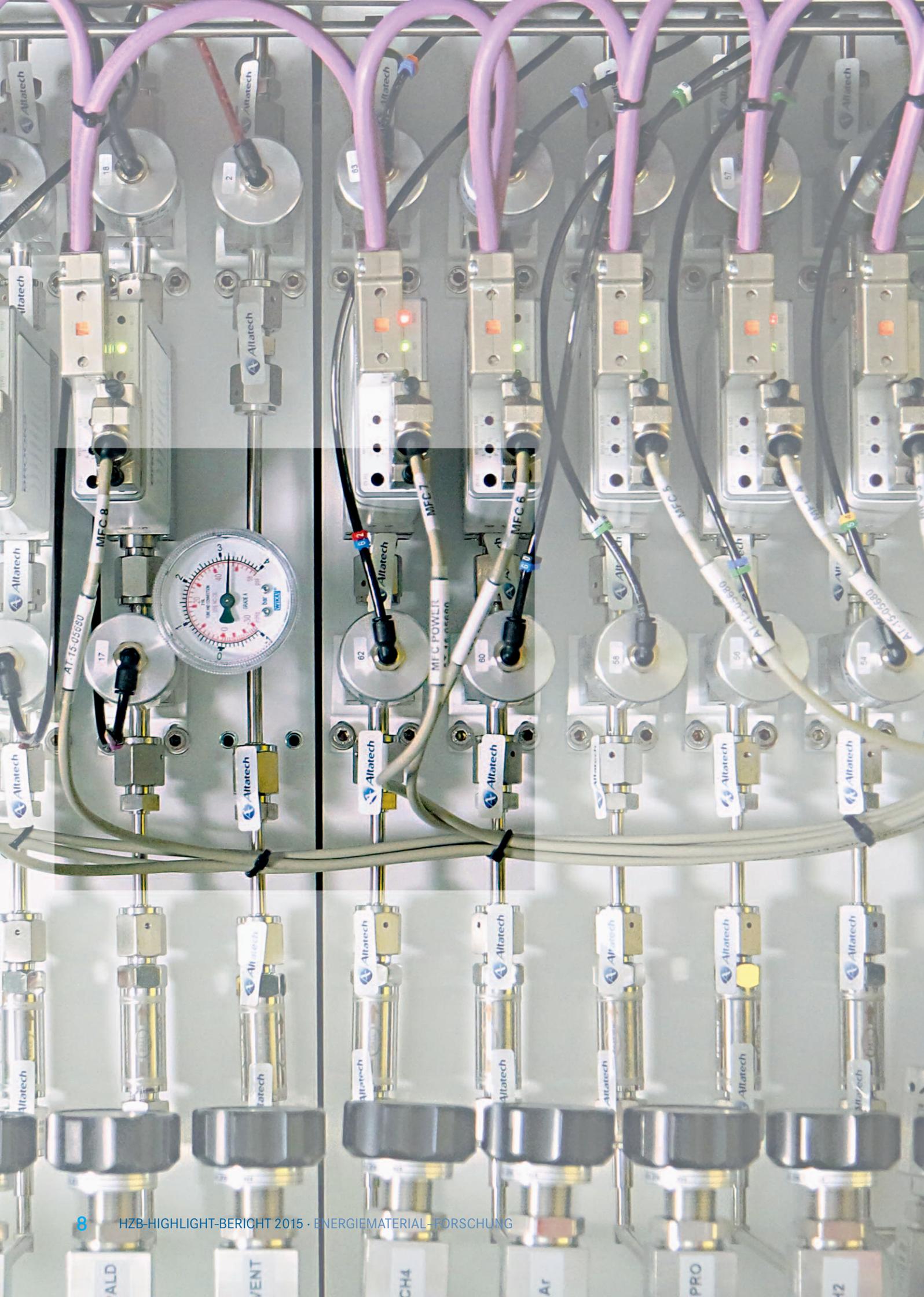
Um die Dynamik in diesen Materialien mit höherer Zeitauflösung zu erfassen, planen wir den Ausbau von BESSY II zu BESSY VSR. Die Abkürzung VSR steht für „Variabler Puls-längen-Speicherring“. Er erzeugt gleichzeitig sowohl extrem kurze als auch längere Lichtblitze: Je nachdem, welche Puls-länge die Forschenden für ihre Experimente benötigen, können sie frei zwischen ihnen „schalten“. „BESSY VSR wird ein wissenschaftlich erstklassiges Großgerät sein. Keine andere Photonenquelle kann Forscherinnen und Forschern diese Flexibilität und diese Möglichkeiten für die Energie-Material-Forschung bieten“, sagt Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla, die wissenschaftliche Geschäftsführerin des HZB. BESSY VSR genießt breiten Rückhalt in der Helmholtz-Gemeinschaft und in externen Gremien. Alle Experten halten den Ausbau für äußerst relevant. „Die Beschleunigerforschung für Photonenquellen am HZB findet weltweit Beachtung“, sagt Kaysser-Pyzalla.

### Erste konzeptionelle Überlegungen für BESSY III

Das HZB hat BESSY VSR erfolgreich auf die Helmholtz-Roadmap für große Infrastrukturen gesetzt und das Projekt in das Verfahren zur Auswahl der strategischen Ausbauinvestitionen der Helmholtz-Gemeinschaft eingebracht. Thomas Frederking, kaufmännischer Geschäftsführer des HZB, betont: „Für die zeitnahe Realisierung haben wir unseren finanziellen Eigenanteil deutlich aufgestockt. Im günstigsten Fall und mit tatkräftiger Unterstützung aller Mitarbeiter im Hause kann BESSY VSR ab dem Jahr 2020 in Betrieb gehen.“ Parallel zum Aufbau von BESSY VSR werden

auch die Strahlrohre und Endstationen für die Forschung an Energie-Materialien optimiert. Damit werden sie noch attraktiver für unsere Schwerpunktthemen und für die externen Nutzerinnen und Nutzer. Auch für ein Nachfolgegerät beginnen konzeptionelle Vorüberlegungen bereits jetzt. Mittelfristig benötigen die Nutzer von VUV und weicher Röntgenstrahlung eine Lichtquelle der nächsten Generation. Das HZB hat eine solche Lichtquelle (BESSY III) bereits erfolgreich auf die Helmholtz-Roadmap für große Infrastrukturen gebracht und sich entschlossen, diese Quelle als Vorschlag für die nächste Ausschreibung der Roadmap für Forschungsinfrastrukturen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) einzubringen. BESSY III im VUV- und weichen Röntgenbereich, die geplante DALI-Quelle am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf im Terahertz- und Infrarotbereich und die geplante PETRA IV-Quelle am DESY im harten Röntgenbereich werden sich optimal ergänzen. Weitere wichtige Labor-Infrastrukturen für die Energie-Materialforschung entstehen zurzeit auf dem Lise-Meitner-Campus am Standort Wannsee. Zum Beispiel das ZEISS Lab@location mit modernsten Elektronenmikroskopen oder die großen Laserlabore. Diese Laborkomplexe werden externen Nutzern offenstehen und den Campus Wannsee attraktiv für Gäste aus der ganzen Welt machen. Anke Kaysser-Pyzalla ist überzeugt: „Im Jahr 2020 wird das HZB für eine erstklassige Energie-Materialforschung und den Betrieb der Photonenquelle BESSY II/BESSY VSR für die internationale Nutzergemeinschaft stehen. Im Idealfall gibt es in den Jahren nach 2020 erste industriell hergestellte Prototypen für die Energiewandlung und -speicherung, die ihren Ursprung im HZB haben. Bis 2030 wird das HZB in der Energie-Materialforschung mit Fokus auf Dünnschichtsystemen eine weltweit führende Rolle einnehmen.“

*Roland Steitz und Olaf Schwarzkopf*



# ENERGIEMATERIAL-FORSCHUNG

**75 Kooperationen** mit Unternehmen ging das HZB 2015 neu ein, darunter 13 mit internationalen Partnern. Ende 2015 war das HZB an 113 Industriekooperationen beteiligt, davon entfallen 26 Prozent auf Kooperationen mit Unternehmen aus dem Ausland.

**8 Patente** wurden dem HZB 2015 vom Deutschen Patent- und Markenamt erteilt. Ende 2015 umfasste der Schutzrechtsbestand des HZB 289 Schutzrechte im In- und Ausland, davon 203 erteilte Patente. 26 Schutzrechte waren Vertragsgegenstand laufender Lizenzverträge.

**74 Kooperationen** mit Partnern aus der Wissenschaft hat das HZB im Jahr 2015 neu abgeschlossen, darunter 27 mit internationalen Partnern. Insgesamt lag die Zahl der wissenschaftlichen Kooperationen Ende 2015 bei 231, davon entfallen 41 Prozent auf Kooperationen mit ausländischen Partnern.

Das neue **Energiematerialforschungslabor EMIL** ist nach der Abnahmephase, Installation und Inbetriebnahme

der Analytik sowie der Installation und Inbetriebnahme der Depositions-, Probentransfer- und Analyseanlagen in die Betriebsphase eingetreten. Erste Testmessungen mit Laborlichtquellen wurden bereits durchgeführt. Nach dem Einbau der beiden Insertion Devices in den Speicherring BESSY II und den zugehörigen Strahlführungen wird EMIL im Jahr 2017 in vollem Umfang für die Nutzer bereit stehen.

Die „**Helmholtz Energy Materials Foundry (HEMF)**“ ist als zentrenübergreifende Helmholtz Forschungsinfrastruktur und dedizierte, internationale Nutzerplattform des Forschungsbereichs Energie konzipiert. Der wissenschaftliche Fokus von HEMF liegt auf den Themen solare Brennstoffe, Solarzellen, Brennstoffzellen, Batteriesysteme sowie thermoelektrische und thermochemische Materialien. An dem Vorhaben sind aus dem Forschungsbereich Energie der Helmholtz-Gemeinschaft die sechs Zentren FZJ, HZB, HZG, HZDR, KIT und DLR beteiligt. Die Koordination liegt beim HZB. Das Vorhaben hat ein Gesamtvolumen von 35,4 Millionen Euro.

## IGEL UND ANTI-IGEL FÜR DEN SPINFILTER

Wissenschaftler des HZB haben mit Experimenten an BESSY II mehr über das **Drehverhalten von Spins in Graphen** herausgefunden. Ihre Erkenntnisse sind ein wichtiger Schritt hin zur verlustfreien Leitung von Spinströmen.

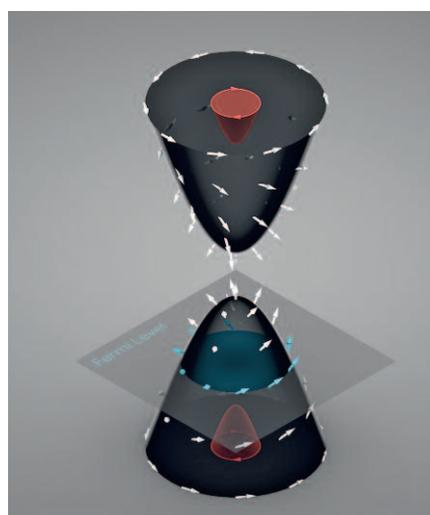
Seit geraumer Zeit experimentieren HZB-Forscher mit Graphen, einem Material, das für seine besonders leicht beweglichen Elektronen bekannt ist. Sie wollen das Material mit einer weiteren Eigenschaft ausstatten. Dabei handelt es sich um eine Kopplung zwischen der Bewegungsrichtung dieser Elektronen und ihrem Eigen Drehimpuls, dem Spin. Die Spineigenschaft ist eine Spezialität schwerer Elemente, wie beispielsweise Gold. Graphen besteht aus Kohlenstoff und ist dafür zu leicht. Jedoch beherrscht man am HZB die Methode, Gold kontrolliert unter eine Graphen-Lage zu schieben. So können in der Tat bestimmte Spinmuster erzeugt werden, die als Rashba-Effekt bekannt wurden. Bislang gelang das allerdings nur in der Ebene des Graphen. Nun ist es Dr. Andrei Varykhalov und seinen Mitarbeitern gelungen, den Spin auch aus der Ebene herauszudrehen.

### Igel und Anti-Igel

Dabei drehen sich die Spins kontinuierlich von der Ebene in die Senkrechte, eine Ausrichtung wie bei den Stacheln eines Igels. Das konnten die Forscher mit spinaufgelöster Photoemissionsspektroskopie an BESSY II nachweisen. Tatsächlich sind solche Igel-Strukturen beispielsweise aus der Kernphysik bekannt. Das sind einzigartige Punkte, die eigentlich dem Verbot magnetischer Monopole nach Gauss widersprechen würden. Hier wirft Varykhalov jedoch ein, dass im Graphen alles zweifach vorhanden ist, da seine Bienenwabenstruktur aus zwei äquivalenten Atomgittern zusammengesetzt ist. Tatsächlich gibt es zu dem Igel auch eine Art Anti-Igel. Beide zusammen heben das Monopol auf.

### Design eines Spinfilters

Dass sich Igel und Anti-Igel aufheben, bedeutet jedoch nicht, dass sie keine physikalischen Auswirkungen hätten, ganz im Gegenteil, erklärt Prof. Dr. Oliver Rader, der Leiter der Abteilung. Die Physiker haben nämlich in ihrer Arbeit ein spintronisches Bauteil vorgeschlagen, das die Igelstruktur ausnutzt, um einen sehr effizienten Spinfilter zu realisieren. Im Spinfilter werden die Spins nach rechts oder links abgelenkt, der resultierende Spinstrom ist prinzipiell



Die Illustration zeigt, wie sich an den Energieflächen der Elektronen im reziproken Raum die Spins aus der Ebene herausdrehen. Dabei bildet sich eine Konfiguration, die an die Stacheln eines Igels erinnert.

verlustlos und könnte in der Zukunft den Energieverbrauch in der Informationstechnologie reduzieren.

Der von den HZB-Forschern gemessene Effekt im Graphen ist vor einigen Jahren von Wissenschaftlern aus Budapest vorhergesagt worden. Andros Kormányos hatte nachgewiesen, dass der Igel und der Anti-Igel auch bei den Vorläufersystemen schon angelegt waren, jedoch einander untrennbar überlagert. Erst durch Brechung der Untergittersymmetrie, die Varykhalov durch Wahl eines Substratkristalls mit einer niedrigeren Symmetrie bewerkstelligt hat, konnte er den Igel und den Anti-Igel voneinander trennen. Damit wurde ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum Spinfilter gemacht.

arö

Nature Communications, 6:7610 (DOI: 10.1038/ncomms8610):

Tunable Fermi level and hedgehog spin texture in gapped graphene; A. Varykhalov, J. Sánchez-Barriga, D. Marchenko, P. Hlawenka, P.S. Mandal and O. Rader

Phys. Rev. B 83, 155439 (2011), (DOI: 10.1103/PhysRevB.83.155439):

Effect of sublattice asymmetry and spin-orbit interaction on out-of-plane spin polarization of photoelectrons; P. Rakyta, A. Kormányos and J. Cserti

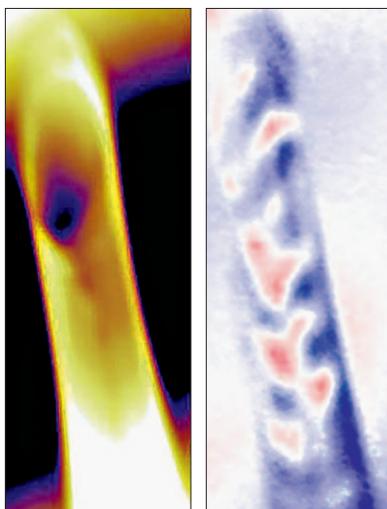
## MAGNETISCHE MUSTER DREIDIMENSIONAL AUSLESEN

Eine internationale Kooperation von Forschern hat es geschafft, mit **Synchrotronlicht komplexe Magnetisierungsmuster** in gewickelten magnetischen Schichten dreidimensional auszulesen. Dieses Verfahren könnte für die medizinische Diagnostik eingesetzt werden.

**F**eine Strukturen im Inneren von Materialien und biologischen Proben lassen sich heute mit Röntgentomographie gut ermitteln: Dabei werden Schicht für Schicht Bilder aufgenommen und am Computer zu einer dreidimensionalen Abbildung zusammengesetzt. Um aber auch magnetische Strukturen im Inneren von Proben zu erfassen, gab es bislang noch keine vergleichbare Methode. Nun haben Teams des HZB und des Instituts für Festkörperphysik in Dresden zusammen mit Partnern der Advanced Light Source am Lawrence Berkeley National Laboratory sowie der University of California in Santa Cruz ein Verfahren entwickelt, mit dem dies möglich ist.

### 2D-Aufnahmen an unterschiedlichen Lichtquellen

Sie untersuchten dafür Proben aus extrem dünnen magnetischen Schichten (Nickel oder Kobalt-Palladium), die zu Röhren mit etwa zwei Windungen aufgewickelt wurden. Um ein 3D-Abbild der Magnetisierung in den Röhren zu erhalten, wurden die Proben mit zirkular polarisiertem Röntgenlicht durchleuchtet. Bei den Aufnahmen am Röntgenmikroskop an der Advanced Light Source und an der XPEEM-Beamline von BESSY II wurden die Proben für jede neue Aufnahme etwas gedreht, sodass eine Reihe von



Links ist die durchleuchtete Probe zu sehen, rechts sind die Magnetisierungsdomänen (rot-blaue Muster) sichtbar. Die Probe ist eine 20 Nanometer dicke Schicht, die zu einer Röhre mit zwei Windungen aufgewickelt wurde. Die Röhre besitzt einen Durchmesser von 5 Mikrometern und eine Höhe von 50 Mikrometern.

2D-Aufnahmen entstanden: „Das polarisierte Licht hat die magnetischen Schichten aus unterschiedlichen Winkeln durchdrungen: Im XPEEM konnten wir dabei nicht nur die magnetischen Strukturen an der Oberfläche messen, sondern auch durch den 'Schattenwurf' noch Informationen gewinnen“, erklärt Dr. Florian Kronast, der am HZB für die XPEEM-Beamline verantwortlich ist.

### 3D-Rekonstruktion der magnetischen Strukturen

Insgesamt gelang es den Physikern, die magnetischen Strukturen am Computer dreidimensional zu rekonstruieren. Dabei konnten sie in den Proben Strukturen von 75 Nanometern Größe abbilden. „Kleinere magnetische Strukturen gab es in diesen Proben einfach nicht, die mögliche Ortsauflösung dieser Methode liegt jedoch bei unter 20 Nanometern“, sagt Kronast. Der entscheidende Punkt ist, dass bislang für die Abbildung von magnetischen Domänen im Nanometer-Bereich in dreidimensionalen Objekten nur die Elektronenholographie in Frage kam, die eine sehr komplizierte Probenpräparation erfordert und die Magnetisierung nur indirekt über die resultierende Magnetfeldverteilung ermitteln kann. „Unser Verfahren dagegen ermöglicht nun eine direktere Kartierung der Magnetisierung in 3D. Die Kenntnis der Magnetisierung ist die Voraussetzung, um die Empfindlichkeit von Magnetfeldsensoren zu verbessern.“

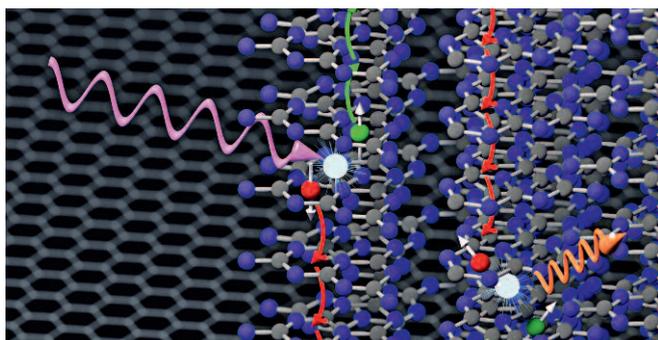
Die neue Methode könnte für Forscher und Entwickler interessant sein, die sich mit feinsten magnetischen Strukturen in kleinen Volumina befassen, zum Beispiel um empfindlichere Sensoren für die medizinische Bildgebung zu entwickeln. Verfahren wie die Magnetoenzephalographie beruhen darauf, dass die elektrische Aktivität einzelner Nervenzellen sehr schwache magnetische Felder erzeugt, die dann von außen nachweisbar sind – mit entsprechend empfindlichen Sensoren. arö

Nature Communications 6, 7612, (DOI: 10.1038/ncomms8612): Retrieving spin textures on curved magnetic thin films with full-field soft X-ray microscopies; R. Streubel, F. Kronast, P. Fischer, D. Parkinson, O. G. Schmidt and D. Makarov

## NEUE MATERIALKLASSE FÜR DIE ORGANISCHE ELEKTRONIK

Eine Kooperation von Forschern des HZB, der Universität Rostock sowie der Freien Universität Berlin und anderer Partner hat herausgefunden, wie der **Ladungstransport in polymeren Kohlenstoffnitriden** funktioniert. Sie könnten als preisgünstiger Photokatalysator die Spaltung von Wasser mit Sonnenlicht befördern.

**P**olymeren Kohlenstoffnitride sind organische Verbindungen, die als gelbes Pulver aus Myriaden von Nanokristallen synthetisiert werden. Die kristalline Struktur ähnelt der von Graphit, denn die Kohlenstoffnitrid-Gruppen sind nur in der Ebene chemisch verbunden, während zwischen den Ebenen nur schwache „Van-der-Waals-Kräfte“ für den Zusammenhalt sorgen. Dass Licht in dieser



Ladungsträger nehmen stets den Weg senkrecht zu den Ebenen, dies zeigte die Gruppe um Merschjann: Dabei erzeugt Licht ein Elektron-Loch-Paar. Umgekehrt kommt es beim Aufeinandertreffen von Elektron und Loch unter bestimmten Voraussetzungen (Bildung eines Singlet-Exzitons) zur Abgabe von Licht (Fluoreszenz). Im Hintergrund ist ein Graphennetz angedeutet.

Materialklasse ein Elektron-Loch-Paar erzeugen kann, war bereits bekannt. So gab es schon zahlreiche Versuche, polymere Kohlenstoffnitride als preiswerte Photokatalysatoren für die solare Wasserspaltung einzusetzen, allerdings ist die Effizienz bislang vergleichsweise gering. Das Team um Dr. Christoph Merschjann, der am HZB Institut Methoden der Materialentwicklung sowie an der Freien Universität Berlin tätig ist, und Prof. Dr. Stefan Lochbrunner von der Universität Rostock hat erstmals einen genauen Blick in die Prozesse bei der lichtinduzierten Ladungstrennung geworfen. Die Kooperation wurde durch das Cluster-Projekt „Light2Hydrogen“ initiiert. Ziel dieses von 2010 bis 2014 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts war die Entwicklung der Grundlagen für eine Technologie auf photokatalytischer Basis, die mittels Sonnenlicht

eine direkte Herstellung von Wasserstoff aus Wasser erlaubt, sowie deren erste technische Realisierung ermöglicht.

### Licht erzeugt Ladungsträger

„Das interessanteste Ergebnis ist, dass Ladungen bei den von uns untersuchten Prozessen praktisch nur entlang einer Dimension transportiert werden, und zwar senkrecht zu den graphitähnlichen Schichten“, erklärt Merschjann. Dabei erzeugt Licht ein Elektron-Loch-Paar, das sich anschließend in entgegengesetzte Richtungen auseinanderbewegt. Mit Hilfe von Femtosekundenspektroskopie sowie weiteren spektroskopischen zeitaufgelösten Methoden konnten die Forscher erstmals quantitativ Beweglichkeit und Lebensdauer der Ladungsträger bestimmen. Dabei zeigte sich, dass die Beweglichkeit ähnliche Werte wie in konventionellen organischen Halbleitermaterialien erreicht. Darüber hinaus bleiben die Ladungsträger lange erhalten, bevor sie rekombinieren.

Polymere Kohlenstoffnitride sind ungiftig, günstig und extrem belastbar, da sie chemisch sehr stabil sind und Temperaturen bis circa 500 Grad Celsius standhalten. Bauelemente aus solchen Verbindungen könnten also in Umgebungen eingesetzt werden, die für die heutige organische Elektronik nicht geeignet sind. Besonders interessant findet Merschjann die Perspektive, diese Verbindungen geordnet auf Graphen aufwachsen zu lassen. Denn Graphen besitzt eine extrem hohe Leitfähigkeit in der Ebene, während die Kohlenstoffnitride im Wesentlichen nur senkrecht dazu leitfähig sind. „Die Kohlenstoffnitride müssen den Vergleich mit konventionellen organischen Halbleitermaterialien nicht scheuen – im Gegenteil: mit ihrer Eigenschaft als quasi eindimensionale Halbleiter könnten sich ganz neuartige vollorganische optoelektronische Bauelemente realisieren lassen“, hofft Merschjann, der sich im aktuellen DFG-geförderten Forschungsprojekt an der FU Berlin mit dem direkten Nachweis der Ladungsträger beschäftigt. arö

Advanced Materials (DOI: 10.1002/adma.201503448): Complementing Graphenes: 1D Interplanar Charge Transport in Polymeric Graphitic Carbon Nitrides; C. Merschjann et. al

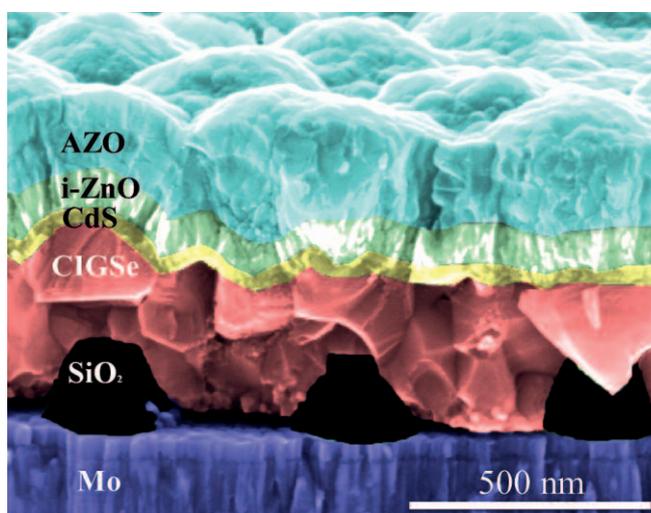
## WIE NANOTEILCHEN SOLARZELLEN EFFIZIENTER MACHEN

Wissenschaftler konnten am HZB erstmals experimentell nachweisen, wie auf der Rückseite von ultradünnen CIGSe-Solarzellen angebrachte **Nanoteilchen aus Titandioxid** die Effizienz der Solarzellen beeinflussen. Sie könnten dadurch noch dünner und kostengünstiger hergestellt werden.

**C**IGSe-Solarzellen sind aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen aufgebaut und können hohe Wirkungsgrade bei der Umwandlung von Sonnenlicht in Strom erreichen. Um wertvolles und teures Indium einzusparen, soll die CIGSe-Schicht jedoch so dünn wie möglich sein. Dadurch sinkt allerdings der Wirkungsgrad sehr stark. Ein Team am Helmholtz-Zentrum Berlin hat es geschafft, ultradünne CIGSe-Schichten von hoher Qualität herzustellen und mit winzigen Nanoteilchen auf der Rückseite der Zelle den Wirkungsgrad zu steigern.

Nanoteilchen mit Durchmessern von einigen hundert Nanometern reagieren auf Licht in besonderer Weise. Wie sich Anordnungen von solchen Nanoteilchen nutzen lassen, um Solarzellen und andere optoelektronische Bauelemente zu optimieren, untersucht Prof. Dr. Martina Schmid mit der Nachwuchsgruppe Nanooptische Konzepte für die Photovoltaik am HZB. CIGSe-Solarzellen sind als Solarmodule mit Schichtdicken von einigen Mikrometern bereits kommerziell erhältlich. Ihre Dicke und damit ihr Preis lassen sich jedoch nicht beliebig minimieren, denn unterhalb von einem Mikrometer Dicke tritt ein strukturelles Problem auf: Die Ladungsträger treffen häufiger aufeinander und rekombinieren am Rückkontakt, so dass sie für die Stromerzeugung „verloren“ gehen.

„Es dauerte mehr als ein Jahr, bis es mir gelang, ultradünne CIGSe-Schichten von nur 0,46 Mikrometern (460 Nanometern) herzustellen, die noch akzeptable Wirkungsgrade von bis zu 11,1 Prozent erreichen“, sagt Guanchao Yin, der seine Doktorarbeit im Team von Martina Schmid mit Auszeichnung abgeschlossen hat. Um den Wirkungsgrad der ultradünnen CIGSe-Zellen weiter zu steigern, sollten dann Anordnungen von Nanoteilchen eingefügt werden. Martina Schmid konnte dafür auf ihre guten Kontakte zur Arbeitsgruppe von Prof. Albert Polman am Center for Nanooptics in Amsterdam zurückgreifen. Diese Gruppe zählt zu den



Die  $\text{SiO}_2$ -Nanoteilchen (schwarz) wurden direkt auf das Molybdän-Substrat (lila) aufgedruckt, das als Rückkontakt dient. Die CIGSe-Schicht (rot) sowie weitere funktionale Schichten wurden auf das Nanomuster aufgebracht. Weil diese Schichten extrem dünn sind, drückt sich das Muster der Nanoteilchen erkennbar bis zur oberen Schicht durch.

Pionieren auf dem Gebiet der Nanophotonik und ist in der Lage, beliebige Anordnungen von Nanoteilchen mit spezialisierten Nanodruck-Technologien zu produzieren.

### Nanoteilchen auf der Vorderseite sind wenig effektiv

Im ersten Schritt brachten die Kollegen aus Amsterdam ein Muster aus dielektrischen Titandioxid-Nanoteilchen ( $\text{TiO}_2$ ) oben auf der ultradünnen Solarzelle auf. Die Nanoteilchen sollten wie Lichtfallen wirken und das Licht in die CIGSe-Schicht weiterleiten. Dennoch wirkte sich dies weitaus weniger positiv auf den Wirkungsgrad aus als beispielsweise bei Silizium-basierten Solarzellen. Yin stellte daher weitere Versuche an und fand schließlich heraus, was am besten funktionierte: Nanoteilchen hinter der Absorberschicht, direkt auf dem Rückkontakt.

Die Amsterdamer Kollegen stellten dafür eine Anordnung von dielektrischen  $\text{SiO}_2$ -Nanoteilchen direkt auf dem Rückkontakt der Zelle her, einem Molybdän-Substrat. Auf dem derart strukturierten Substrat trugen Yin und die Kollegen am HZB eine ultradünne CIGSe-Schicht sowie alle weiteren Schichten auf, die für die Solarzelle nötig sind. Dadurch stieg der Wirkungsgrad von 11,1 auf 12,3 Prozent. Gleichzeitig nahm die Kurzschluss-Stromdichte der ultradünnen

CIGSe-Zelle um mehr als zwei Milliampere je Quadratzentimeter zu. Mit zusätzlichen Antirefleksions-Nanoteilchen auf der Vorderseite ließ sich der Wirkungsgrad der Solarzelle sogar auf bis zu 13,1 Prozent steigern.

### Nanoteilchen verhindern die Rekombination

„Die Nanoteilchen auf der Rückseite fangen das Licht und streuen es effizient zurück in die aktive CIGSe-Schicht, deren Absorption dadurch erhöht wird“, erklärt Yin. Weitere Untersuchungen deuten darauf hin, dass die  $\text{SiO}_2$ -Nanoteilchen auf der Rückseite der Zelle außerdem die Rekombination von Ladungsträgern einschränken, was ebenfalls zur Steigerung des Wirkungsgrads beiträgt. „Diese Doktorarbeit zeigt erstmals experimentell, wie sich durch Nanoteilchen auch bei ultradünnen CIGSe-Solarzellen die Effizienz steigern lässt. Dies hat uns auf weitere Ideen gebracht, wie wir zusätzlich zu den optischen auch die elektrischen Eigenschaften von Nanoteilchen nutzen können, um die Absorption von Licht zu er-



Die Leistungsfähigkeit von CIGSe-Solarzellen kann mit zusätzlichen Antirefleksions-Nanoteilchen auf der Vorder- und Rückseite der Zelle deutlich erhöht werden. Außerdem kann die Schichtdicke weiter reduziert werden, sodass die Solarzellen günstiger hergestellt werden können.

höhen und den Verlust von Ladungsträgern zu begrenzen“, sagt Martina Schmid. *arö*

ACS Nano, 2015, 9 (10), pp 9603–9613 (DOI: 10.1021/acsnano.5b04091): Light coupling and trapping in ultra-thin  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  solar cells using dielectric scattering patterns; M.-C. van Lare, G. Yin, A. Polman and M. Schmid

## EINE ALTERNATIVE ZU PLATIN IN KATALYSATOREN

Mit einem neuen Präparationsverfahren haben Teams am HZB und der TU Darmstadt ein preiswertes Katalysatormaterial für Brennstoffzellen analysiert. Es besteht aus **Eisen-Stickstoff-Komplexen**, die in Graphen-Inseln eingebunden sind. Die Ergebnisse der Untersuchung der Katalysatoren lassen sich auch für die solare Wasserstoffproduktion nutzen.

**B**rennstoffzellen wandeln die in Wasserstoff gebundene chemische Energie in elektrische Energie um, indem sie Wasserstoffgas mit Sauerstoff der Luft zu Wasser elektrochemisch „verbrennen“ und dabei Strom erzeugen. Künftige Elektroautos könnten daher anstatt mit schweren Batterien auch sehr gut mit Brennstoffzellen angetrieben werden. Damit jedoch die „kalte“ Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff gut funktioniert, müssen die Anode und die Kathode der Brennstoffzelle mit hochaktiven Katalysatoren beschichtet werden. Das Problem dabei: Bislang werden dafür platinbasierte Katalysatoren eingesetzt, die ein Viertel der Kosten von Brennstoffzellen ausmachen.

Mittlerweile erreichen Eisen-Stickstoff-Komplexe in Graphen, sogenannte Fe-N-C-Katalysatoren, mit Platin-Katalysatoren vergleichbare Aktivitäten für die kathodische Sauerstoffreduktion. „Eine systematische Erforschung der Fe-N-C-Katalysatoren war jedoch schwierig, da die meisten Präparationsansätze zu sehr heterogenen Materialien führen, die neben den gewünschten  $\text{FeN}_4$ -Zentren auch anorganische Verbindungen wie Eisencarbide oder Nitride enthalten“, erklärt Sebastian Fiechter vom HZB.

### Reinigungsverfahren eliminiert störende Verbindungen

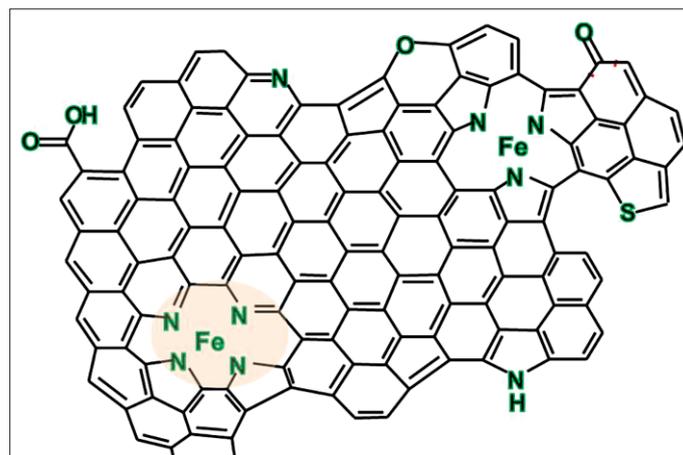
„Bereits vor einigen Jahren haben wir am HZB ein neues Präparationsverfahren entwickelt, bei dem aus metall-

organischen Verbindungen, zum Beispiel Eisen- oder Kobalt-porphyrine, diese preiswerten Katalysatoren hergestellt werden“, berichtet Peter Bogdanoff vom HZB. Ulrike Kramm und Iris Herrmann-Geppert hatten das Herstellungsverfahren im Rahmen ihrer Doktorarbeiten am HZB weiter optimiert. Die besten der am HZB entwickelten Metall-N-C-Katalysatoren hielten etwa bis 2011 den Weltrekord hinsichtlich der Dichte katalytisch aktiver Zentren. Unklar blieb jedoch, ob anorganische Verbindungen die katalytische Wirkung beeinflussen. Dies konnte das Team nun klären.

### FeN<sub>4</sub>-Zentren sorgen für eine hohe katalytische Wirkung

Der Clou in der aktuellen Arbeit ist ein Reinigungsverfahren, das universell für diese Katalysatoren eingesetzt werden kann. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus thermischer Behandlung mit anschließendem Ätzschritt. Damit kann der Anteil an störenden Metallverbindungen auch bei ursprünglich sehr heterogen zusammengesetzten Metall-N-C-Katalysatoren nachträglich deutlich reduziert werden. Interessant ist hierbei, dass parallel die Aktivität enorm ansteigt. Ulrike Kramm, inzwischen Juniorprofessorin an der TU Darmstadt, gelang es, einige Katalysatoren so zu reinigen, dass sämtliches Eisen ausschließlich in der komplexierten Form aus Eisen und vier Stickstoffatomen (FeN<sub>4</sub>) in den Graphenebenen vorliegt. Damit widerlegen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die in Fachkreisen diskutierte These, nach der etwa Eisen-Nanopartikel die Aktivität von FeN<sub>4</sub>-Zentren als sogenannte Promotoren verbessern.

„Um diese These zu überprüfen, haben wir eine Vielzahl komplexer Methoden zur Strukturforschung eingesetzt, wie Mößbauer-Spektroskopie, Elektronenspinresonanz-



Skizziert ist eine Nanoinsel aus Graphen, in die Eisen-Stickstoff-Komplexe eingelagert sind. Katalytisch wirksam sind FeN<sub>4</sub>-Komplexe (orange markiert).

spektroskopie und die Röntgenabsorptions-Spektroskopie bei BESSY II. Damit konnten wir die Zusammensetzung der Katalysatoren genau vermessen“, berichtet Kramm. Das Reinigungsverfahren ermöglicht es uns nun, Katalysatoren mit ausschließlich FeN<sub>4</sub>-Zentren zu erzeugen, so dass wir ganz gezielt untersuchen können, inwieweit bestimmte Verbindungen als Promotoren die Aktivität oder Stabilität verbessern“, fasst Kramm ihren Forschungsansatz an der TU Darmstadt zusammen.

### Ergebnisse auch für solare Wasserstoffproduktion verwendbar

Sebastian Fiechter und Peter Bogdanoff setzen am HZB ihre Forschungen an neuartigen Katalysatoren fort: „Die Einsichten in die Wirkungsweise dieser Metall-N-C-Katalysatoren können wir auch für die Entwicklung von Katalysatormaterialien für die solare Wasserstoffproduktion nutzen, die wir am HZB vorantreiben“, sagt Fiechter. Koppelte man die Forschungsaktivitäten am HZB und der TU Darmstadt, so wäre es möglich, einen komplett regenerativ arbeitenden Energiekreislauf darzustellen, in dem der solar erzeugte Wasserstoff emissionsfrei in kostengünstigen Brennstoffzellen umgesetzt würde. arö



Fahrzeuge mit Brennstoffzellen wie der Toyota Mirai, die mit Wasserstoff betankt werden, benötigen für die „kalte“ Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff aus der Luft hochaktive Katalysatoren, für die bislang das sehr teure Platin verwendet wird. Dank der am HZB und der TU Darmstadt erzielten Forschungsergebnisse könnten für solche Katalysatoren künftig deutlich günstigere Materialien eingesetzt werden, die ähnlich effizient arbeiten.

J. Am. Chem. Soc., 2016, 138 (2), pp 635–640 (DOI: 10.1021/jacs.5b11015): On an easy way to prepare Metal-Nitrogen doped carbon with exclusive presence of MeN<sub>4</sub>-type sites active for the Oxygen Reduction Reaction (ORR) ; U. I. Kramm, I. Herrmann-Geppert, J. Behrends, K. Lips, S. Fiechter and P. Bogdanoff

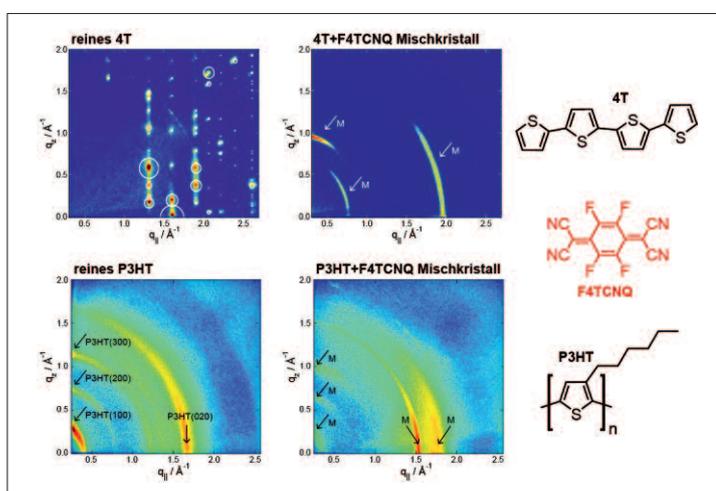
## MISCHKRISTALLE IM KRISTALL

Die gemeinsame Forschergruppe „Molekulare Systeme“ des HZB und der Humboldt-Universität zu Berlin hat an BESSY II analysiert, wie **Dotier-Moleküle strukturell in organische Halbleiter integriert** werden. Dass sie anders als in anorganischen Halbleitern angebunden werden, stellt die Forschung vor weitere Aufgaben.

Die moderne Halbleitertechnologie basiert auf Silizium, einem anorganischen Halbleitermaterial, das für den Einsatz in elektronischen Bauelementen mit Fremdatomen dotiert wird. Doch auch organische Festkörper aus konjugierten Molekülen oder Polymeren besitzen halbleitende Eigenschaften, die Anwendungen in der organischen Elektronik ermöglichen. Das enorme Potenzial der organischen Elektronik hat sich in den vergangenen Jahren am Beispiel von Leuchtdioden (OLEDs) deutlich gezeigt. So lassen sich zum Beispiel Oligothiophen (4T) und Polythiophen (P3HT), zwei typische organische Halbleiter, mit einer zweiten Molekülsorte, einem starken Elektronenakzeptor (F4TCNQ), „dotieren“ und dadurch gezielt hinsichtlich ihrer Leitfähigkeit beeinflussen. Wie sich allerdings diese Gastmoleküle in das Wirtsgitter der organischen Halbleiter strukturell integrieren, war bislang kaum bekannt. Daher wurde, in Analogie zu anorganischen Halbleitern, bisher stets eine homogene Verteilung vorausgesetzt.

### Verschieden stark dotierte Proben

Ein internationales Team, geleitet von der gemeinsamen Forschergruppe „Molekulare Systeme“ am HZB und der Humboldt-Universität zu Berlin, konnte nun zeigen, dass dies weder für Oligothiophen noch Polythiophen der Fall ist. Die Gruppe um Dr. Ingo Salzmann und Prof. Dr. Norbert Koch hatte zuvor an anderen Systemen experimentell und theoretisch analysiert, wie sich die Dotierung von organischen Halbleitern auf deren elektronische Struktur und damit deren Leitfähigkeit auswirkt. Daraus ergaben sich Hinweise auf Besonderheiten dieser Materialklasse, bei denen die Hybridisierung der Molekülorbitale eine Schlüsselrolle spielt. Deshalb stellten sie eine Serie von verschieden stark dotierten organischen Dünnschichten her und untersuchten sie mit Röntgenbeugung an der von Dr. Daniel Többens betreuten KMC-2-Beamline an BESSY II. Dadurch konnten sie die kristalline Struktur in Abhängigkeit von der Stärke der Dotierung präzise bestimmen.



Die Röntgenstreuung zeigt links bei reinem 4T (oben) und P3HT (unten) die typischen Reflexe des Wirtsgitters. Bei den stark dotierten Materialien tauchen grundlegend andere Reflexe auf, die das Vorhandensein von Ko-Kristalliten belegen.

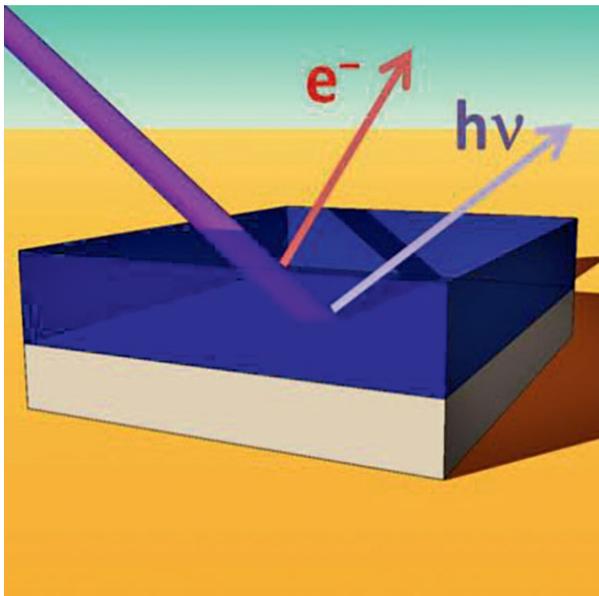
Ihre Ergebnisse zeigten, dass sich die Gastmoleküle – im Gegensatz zur Erwartung – keineswegs gleichmäßig in das Wirtsgitter des organischen Halbleiters einbauen. In der reinen kristallinen Wirtsmatrix bildet sich stattdessen eine zweite kristalline Phase aus Wirt/Gast-Ko-Kristalliten. Der „dotierte“ organische Halbleiter besteht damit aus einer Matrix von „Original“-Kristalliten, in die „Misch“-Kristallite eingebettet sind. Diese Misch-Kristallite übernehmen die eigentliche Rolle der „Dotier“-Moleküle. „Es ist wichtig, die grundlegenden Prozesse bei der Dotierung organischer Halbleiter genauer zu verstehen“, erklärt Salzmann: „Wenn wir solche Materialien erfolgreich in Anwendungen einsetzen möchten, müssen wir ihre elektronischen Eigenschaften genauso präzise kontrollieren können, wie es bei anorganischen Halbleitern heute selbstverständlich ist.“ arö

Nature Communications, 6: 8560 (DOI: 10.1038/ncomms9560): Charge-transfer crystallites as molecular electrical dopants; H. Méndez, G. Heimel, S. Winkler, J. Frisch, A. Opitz, K. Sauer, B. Wegner, M. Oehzelt, C. Röthel, S. Duhm, D. Többens, N. Koch and I. Salzmann

## INHOMOGENE CHLORVERTEILUNG

Mit verschiedenen röntgenspektroskopischen Experimenten an BESSY II hat ein HZB-Team gezeigt, dass sich Chlor in einer bestimmten Klasse von Perowskiten sehr ungleichmäßig verteilt. Die Ergebnisse könnten Wege aufzeigen, wie man die **Effizienz von Perowskit-Dünnschicht-Solarzellen** weiter steigern kann.

Seit 2012 in rascher Folge immer neue Wirkungsgradrekorde vermeldet wurden, zählen organisch-anorganische Perowskit-Materialien zu den interessantesten neuen Materialklassen für Solarzellen. Gerade die organometallischen Halogenid-Perowskite sind kostengünstig, einfach zu verarbeiten und haben Wirkungsgrade von bis zu 20,1 Prozent erzielt. Zu den Pionieren auf diesem Gebiet zählt die Gruppe um Henry Snaith an der University of Oxford.



Experimente an BESSY II zeigten, dass die Konzentration von Chlor an der Grenzfläche Perowskit/ $\text{TiO}_2$  höher ist als in der restlichen Schicht.

Die beste Leistung zeigten bislang Perowskit-Schichten aus einer Lösung von Blei-Methylammonium und den Halogeniden Iod und Chlor. Doch obwohl in den Ausgangsprodukten das Mischungsverhältnis zwischen Chlor und Iod etwa zwei Drittel beträgt, enthalten die fertigen Perowskit-Schichten fast gar kein Chlor, sondern nur noch Iod. Dabei scheint ein gewisser Chloranteil im Material sich günstig auf die Effizienz auszuwirken.

### Chlorgehalt in tieferen Schichten analysiert

Nun hat ein Team am HZB Proben aus der Gruppe um Henry Snaith eingehend analysiert und aufgedeckt, wo Chlor in der Perowskit-Schicht bleibt und wo es verschwindet. Um die Verteilung von Chlor in verschiedenen Schichttiefen der Perowskit-Proben zu untersuchen, nutzten sie zwei Röntgen-Spektroskopie-Methoden an BESSY II. Mittels Hart-Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (HAXPES) an der KMC-1 Beamline analysierten sie die Oberflächen der Perowskit-Proben und konnten dort keine Chloratome nachweisen. Die tieferen Schichten der Probe untersuchten sie mit Fluoreszenz-Röntgen-Absorptionsspektroskopie (FY-XAS). „Nahe der Grenzfläche zwischen Perowskit und dem Titandioxidsubstrat konnten wir eine höhere Konzentration von Chlor nachweisen als in der Perowskit-Schicht selbst“, erklärt Dr. David Starr, Erstautor der Publikation.

### Chlor steigert den Wirkungsgrad

Warum Chlor den Wirkungsgrad günstig beeinflusst, ist noch nicht ganz klar; möglicherweise mindert es die Auswirkungen von Fehlstellen und erhöht somit die Qualität der Perowskit-Schicht. „Diese Ergebnisse werden uns vielleicht zeigen, wie man bei der Herstellung die Verteilung von Chlor besser kontrollieren kann“, sagt Prof. Dr. Marcus Bär, der das HZB-Team leitet. „Das Ziel ist, die Materialzusammensetzung und Deposition gezielt zu steuern, um spezifische, gewünschte Eigenschaften zu erhalten. Wenn wir die nützliche Rolle von Chlor in den bleihaltigen Perowskiten besser verstehen, können wir vielleicht in weiteren Schritten auch das Blei durch weniger toxische Elemente ersetzen.“ Neben der Effizienz ist auch eine umweltfreundlichere Herstellung von Solarzellen ein Ziel der Forschung am HZB. arö

Energy Environ. Sci., 2015, 8, 1609 (DOI: 10.1039/c5ee00403a): Direct observation of an inhomogeneous chlorine distribution in  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  layers: surface depletion and interface enrichment; D. E. Starr, G. Sadoughi, E. Handick, R. G. Wilks, J. H. Alsmeier, L. Köhler, M. Gorgoi, H. J. Snaith and M. Bär

## HAUCHDÜNNE SCHICHTEN FÜR MEHR STROM

HZB-Wissenschaftler haben mit der „**Sprüh-Pyrolyse**“-Methode ein Verfahren entwickelt, mit dem Nanopartikel aus Edelmetall auf Solarzellen aufgebracht werden können. Dies hilft Materialforschern dabei, Solarzellen zu bauen, die noch effektiver Sonnenenergie in elektrischen Strom umwandeln.

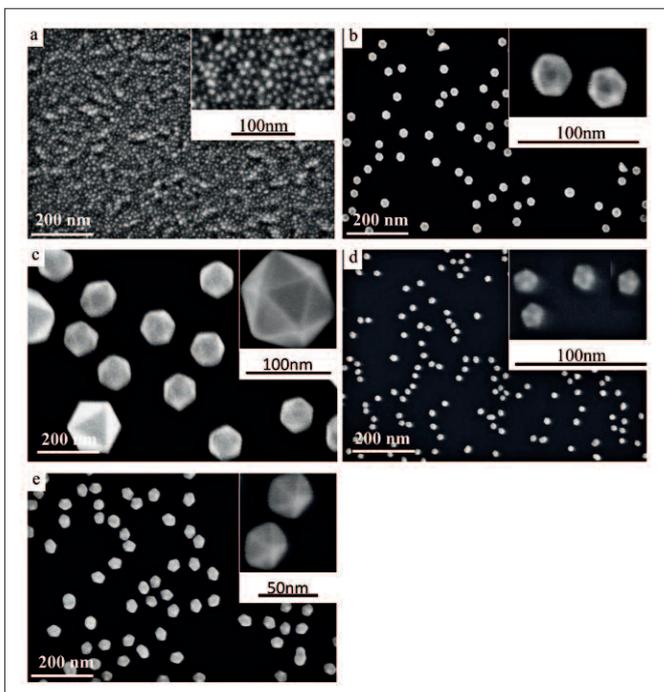
**W**ie so oft in der Wissenschaft stecken hinter großen Durchbrüchen verblüffend einfache Ideen. So wissen Materialforscher schon lange, dass eine Solarzelle nur einen Teil der auftreffenden Sonnenstrahlen in elektrischen Strom umwandelt. Recht viel Licht dagegen verlässt die Zelle ungenutzt. „Schickt man möglichst viel dieser eigentlich schon verlorenen Strahlung zurück in den Absorber, kann zumindest ein Teil davon doch noch zu Elektrizität gemacht werden“, erklärt Martha Lux-Steiner, die bis März 2016 das HZB-Institut für Heterogene Materialsysteme geleitet hat. Das kann zum Beispiel eine ultradünne Lage aus Silber-Nanoteilchen hervorragend. In der Praxis muss diese feinste Lage aus Silber-Nanoteilchen

aber erst einmal aufgebracht werden – und das wiederum mit einer möglichst einfachen und preiswerten Methode. Genau diesen Anspruch erfüllt die Sprühpyrolyse des Arbeitsgruppenleiters „Nasschemie“ Prof. Dr. Christian-Herbert Fischer und von Dr. Yanpeng Fu aus der Nachwuchsgruppe NanooptiX (Nanooptische Konzepte für die Photovoltaik), die winzige Nanoteilchen der Edelmetalle Gold, Silber und Kupfer auf einer Oberfläche abscheidet. Als Ausgangsmaterial benötigen die Forscher Tetrachloridogoldsäure, die unter anderem in der Technik zum Vergolden eingesetzt wird und daher im Spezialhandel verfügbar ist. Diese Säure ist in Ethanol, einem ebenfalls günstigen Alkohol, gelöst. Die Lösung zerstäuben die Forscher mit einem Ultraschall-Gerät, wie es in herkömmlichen Luftbefeuchtern eingebaut ist. Dabei entstehen winzige Tröpfchen, die klein genug sind, um als sogenanntes Aerosol in der Luft zu schweben.

### Hauchdünne Schichten aufsprühen

„Dieses Aerosol leiten wir auf eine Oberfläche, die circa 200 Grad Celsius heiß ist“, erklärt Fischer den nächsten Schritt. Bei dieser Temperatur verdampft der Alkohol rasch und die Tetrachloridogoldsäure bleibt zurück. Als Edelmetall ist das Gold darin eher locker gebunden. Selbst solche für chemische Reaktionen sehr moderaten Temperaturen wie 200 Grad Celsius reichen daher aus, um die Verbindung in ihre Bestandteile zu zerlegen. Dabei entstehen Chlorgas, das abgesaugt wird, und Gold, das sich als Metall auf der heißen Oberfläche niederschlägt. Zunächst sitzen dort nur relativ wenige Atome. Diese Keime ziehen aber weitere Atome an und wachsen zu winzigen Kristallen, deren Kanten am Ende gerade einmal 10 bis 65 Nanometer und damit 0,01 bis 0,065 Tausendstel eines Millimeters lang sind.

Chemiker nennen Reaktionen, bei denen allein hohe Temperaturen größere Verbindungen in ihre Bestandteile zerlegen, nach den griechischen Wörtern für „Feuer“ (pyr) und „Auflösen“ (lysis): Pyrolyse. Da die Tetrachloridogoldsäure aufgesprüht wird, wird die Methode „Sprüh-Pyrolyse“ genannt. Sehr ähnlich klappt das Verfahren auch mit



REM-Aufnahmen von auf Molybdän gezüchteten Quasi-Kugeln aus Gold (a), auf Silizium gezüchteten Ikosaedern mit 15 und 65 Nanometern Seitenlänge (b und c), und auf Silizium gezüchteten Dekaedern mit jeweils 10 und 20 Nanometern Seitenlänge (d und e). Die kleinen Bilder zeigen jeweils Nahaufnahmen.

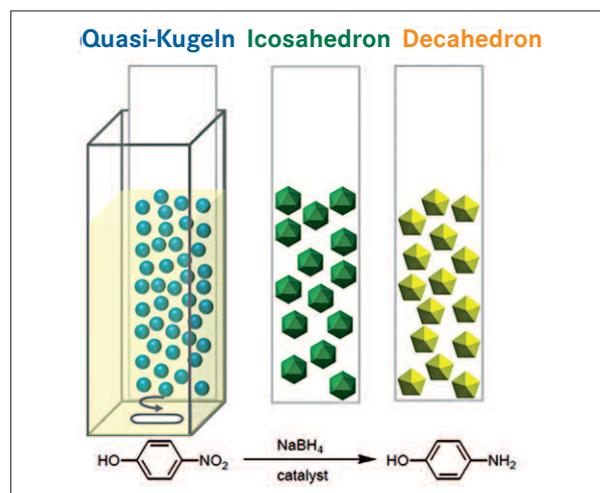
Verbindungen aus anderen Edelmetallen wie Silber und Kupfer. „Wir forschen daher zur Zeit intensiv an der Produktion von Silber-Nanoteilchen zur Verbesserung von Solarzellen“, berichtet Martha Lux-Steiner, die ihre jahrzehntelange Erfahrung – auch nach ihrer Emeritierung im Frühjahr 2016 – gerne weiterhin mit ihren Kollegen teilt.

### Je mehr Oberfläche, desto besser die Reaktion

Fischer war bei seinen Experimenten auch auf die Arbeiten von Kollegen in anderen HZB-Gruppen aufmerksam geworden, die Gold-Nanoteilchen als Katalysatoren für chemische Reaktionen untersuchen. Beim Optimieren dieser Verbindungen können sie jetzt auf Fischers Lösung zurückgreifen: eine Fläche mit einer möglichst dünnen Schicht winziger Katalysatoren zu überziehen, an denen die Reaktion schnell und preiswert abläuft. So wird zum Beispiel der für sehr viele Reaktionen benötigte Wasserstoff, der Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren antreiben kann, mit Hilfe eines Gold-Katalysators aus Kohlenmonoxid und Wasser gewonnen. Ein Goldbarren taugt dafür allerdings weniger, weil solche Reaktionen an der Oberfläche des Edelmetalls ablaufen. Dort aber haben viel zu wenige Moleküle Platz, um eine nennenswerte Ausbeute zu erhalten.

Ein einfacher Zusammenhang löst dieses Problem: Zerlegt man den Goldbarren in viele kleine Teilchen, vergrößert sich die Oberfläche enorm, und die Reaktionen kommen so richtig in Schwung. Und das umso mehr, je kleiner die Teilchen sind. Eigentlich wären also Gold-Nanoteilchen ideal. Nur klumpen die in einer Flüssigkeit verteilten Winzlinge rasch zusammen und lassen ihre Oberfläche genauso schnell schrumpfen. Um das zu verhindern, geben die Forscher organische Moleküle dazu, die sich an die Oberfläche der Nanoteilchen heften. Leider verschlechtern aber solche „Stabilisatoren“ die Eigenschaften des Katalysators, weil sie sich an ihm festsetzen und so einen Teil seiner wertvollen Außenseite blockieren – Fachleute nennen diesen Vorgang „die Oberfläche vergiften“. Dazu kommen noch weitere Probleme, die die Erfolgsbilanz von Gold-Nanoteilchen-Katalysatoren trüben.

Die Sprüh-Pyrolyse aber könnte helfen, auch diese Katalysatoren zu verbessern. Schließlich bilden sich die Gold-Nanokristalle auf festen Materialien ohne Mithilfe von Stabilisatoren und damit natürlich auch ohne Vergiften der Oberfläche. „Diese nackten Gold-Nanoteilchen katalysieren erheblich besser als diejenigen mit Stabilisatoren“, erklärt Fischer. Den Beweis liefert ein kleiner Versuch, in dem der Katalysator in einer häufig genutzten Test-Reaktion die Substanz Nitrophenol in Aminophenol umwandelt. Taucht der Forscher seine Nanoteilchen vor diesem Experiment in eine Lösung mit Stabilisatoren, vergiften diese ähnlich wie in herkömmlichen Katalysatoren die Oberfläche. Verzichteten die HZB-Chemiker dagegen auf dieses Eintauchen, läuft die Test-Reaktion bis zu vier Mal effizienter ab als mit dem vergifteten Katalysator.



Schematische Darstellung der selbstorganisierten Goldnanoteilchen, also Quasi-Kugeln, Icosaeder und Dekaaeder, die auf dem Substrat liegen, das als heterogener Katalysator für die Reduktion von 4-NP benutzt wird.

### Gezieltes Steuern der Größe der Nanoteilchen

Offensichtlich ist die Sprüh-Pyrolyse also ein vielversprechender Weg, um nicht nur die Effizienz von Solarzellen, sondern auch die Wirksamkeit von Gold-Nanoteilchen-Katalysatoren erheblich zu verbessern. „Das Material kann obendrein gut optimiert werden“, erklärt Fischer weiter. So kann der Forscher die Größe der Nanoteilchen und damit die Oberfläche des Katalysators sehr einfach steuern: Je länger er die Alkohol-Lösung mit der Tetrachloridogold-säure aufsprüht, umso größer werden die Kristalle. Unterschiedliche Konzentrationen dieser Gold-Verbindung ergeben jeweils andere Kristall-Formen. Auch die Art der Oberfläche, auf die Fischer das Aerosol sprüht, beeinflusst die Form der wachsenden Kristalle stark. Geben die Forscher zusätzlich Kupfer-Ionen in die Sprühlösung, entstehen noch einmal andere Kristall-Formen.

Die Wissenschaftler müssen also nur die Bedingungen einstellen, dann organisieren sich die Nanoteilchen selbst zu der jeweiligen Form. Preiswert ist das Verfahren obendrein. Nicht nur, weil es relativ einfach ist und zum Beispiel die sonst häufig verwendete und teure Maskentechnik überflüssig macht. Sondern auch, weil die Gold-Nanoteilchen wieder verwendet werden können und man auf diese Weise die Materialkosten niedrig halten kann. Ein ganzer Quadratmeter Katalysatorfläche trägt gerade einmal 36 Milligramm Gold mit einem Marktwert von 1,20 Euro. Die Sprüh-Pyrolyse ist also ein Low-Cost-Verfahren, mit dem sich auch große Flächen preiswert behandeln lassen. rk

Advanced Synthesis & Catalysis, 2015 (DOI: 10.1002/adsc.201500848): In situ Synthesis of Stabilizer-Free Gold Nanocrystals with Controllable Shape on Substrates as Highly Active Catalysts for Multiple Use; Y. Fu, Y. Lu, F. Polzer, M. Ch. Lux-Steiner and C.H. Fischer

## NEUES LABOR FÜR DIE ENERGIEMATERIAL-FORSCHUNG

Spitzenforschung an neuartigen Energiematerialien mit **modernsten ZEISS Elektronenmikroskopen** – das ist das Ziel der von ZEISS und dem HZB etablierten Partnerschaft. Ende 2015 sind die Labore offiziell eingeweiht worden.

**H**erausragende Kenntnisse in der Implementierung fortschrittlicher Mikroskopie-Technologien und Anwendungen sind wesentliche Grundlagen für den Aufbau des ZEISS labs@location-Programms. Der exzellente Ruf des HZB in Wissenschaft und Industrie hat zur Aufnahme des Zentrums in dieses Programm geführt. „Diese Kooperation passt perfekt in die Strategie des HZB, so genannte Core-Labs für die Forschung an Energiematerialien mit modernster, teilweise einzigartiger Ausstattung aufzubauen“, sagte Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla, wissenschaftliche Geschäftsführerin des HZB, bei der feierlichen Einweihung der Labore: „Die Core-Labs stärken unsere Schwerpunkte in der Energieforschung. Zusätzlich sollen sie als attraktive Infrastrukturen auch externen Nutzerinnen und Nutzern zur Verfügung stehen und zu weiteren strategischen Partnerschaften anregen.“

Dr. Markus Weber, Leiter des ZEISS Unternehmensbereichs Microscopy, sprach bei der Einweihung über die Bedeutung der wissenschaftlichen Community für das ZEISS labs@location-Programm: „Unsere Intention ist es, einen Zusammenschluss von Menschen zu schaffen, die weltweit an der Spitze von Wissenschaft und Forschung stehen – indem sie voneinander lernen, Fachwissen austauschen und sich gegenseitig zu Neuem inspirieren.“

### Neueste Rasterelektronen- und Ionenmikroskopiesysteme

Das HZB ist auf dem Lise-Meitner-Campus in Wannsee mit den neuesten Rasterelektronen- und Ionenmikroskopiesystemen ausgerüstet worden. ZEISS Crossbeam 340 FIB-SEM, ZEISS MERLIN FE-SEM und ZEISS ORION NanoFab stellen sicher, dass Wissenschaftler Materialien im Nano-



Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla (5.v.l.), wissenschaftliche Geschäftsführerin des HZB, Thomas Frederking (6.v.l.), kaufmännischer Geschäftsführer des HZB und Dr. Markus Weber (li.) bei der Einweihung des im Rahmen des ZEISS labs@location Programms aufgebauten Labors.

Maßstab mit den fortschrittlichsten Techniken bearbeiten und abbilden können. So konnten Forscher vom federführenden HZB-Institut Nanoarchitekturen für die Energieumwandlung bereits demonstrieren, dass eine Nano-Modifizierung die Lichtaufnahme einer Dünnschichtsolarzelle um zwei Drittel erhöht, wodurch die Effizienz der Solarzelle erheblich gesteigert werden kann.

Die Zusammenarbeit von ZEISS und HZB umfasst gemeinsame Workshops und Trainings, Gerätevorführungen sowie den wissenschaftlichen Austausch. Experten des HZB stehen gemeinsam mit Spezialisten von ZEISS bei wissenschaftlichen Kooperationen beratend zur Seite, um auf spezifische Applikationen und Systemkonfigurationen einzugehen. Von dieser engen Zusammenarbeit profitieren HZB, ZEISS und Kooperationspartner und gewinnen zusätzliche Blickwinkel auf ihre Forschung und Entwicklung.

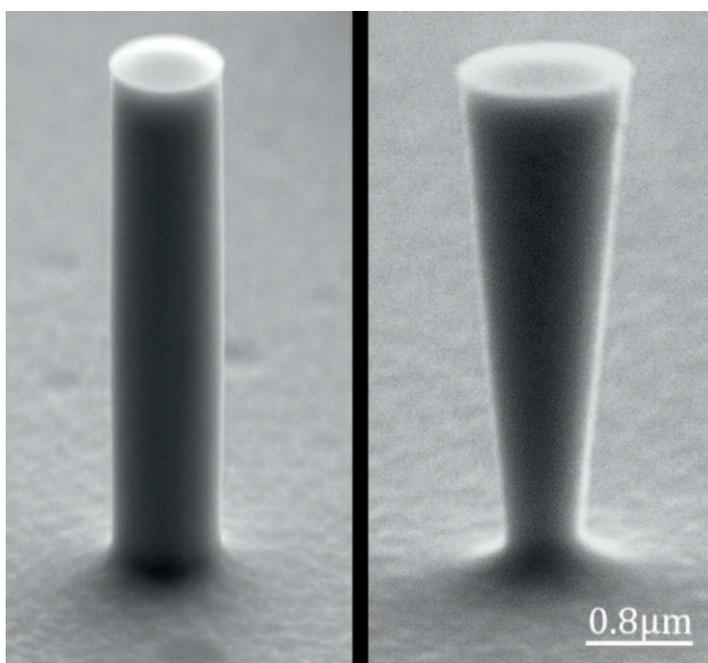
## FLÜSTERGALERIEN FÜR DAS LICHT

Wissenschaftler des HZB und des Max-Planck-Instituts für die Physik des Lichts haben herausgefunden, dass Nanostrukturen die **Lumineszenz des Halbleitermaterials Silizium** verstärken. Neue Anwendungen bis hin zu Nanolasern auf Siliziumbasis sind damit denkbar.

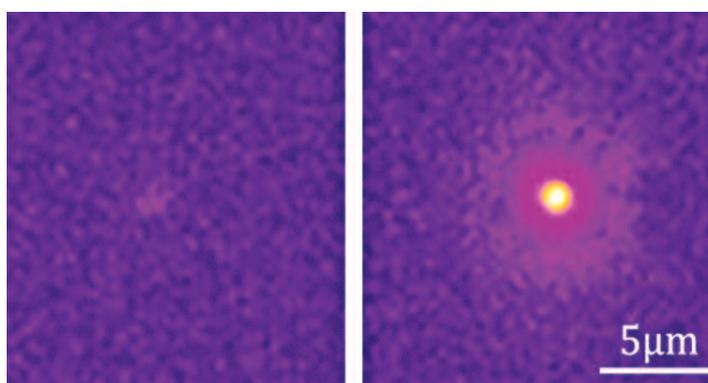
**S**ilizium zählt zu den Standardmaterialien für Computerchips und Solarzellen. Doch obwohl die Eigenschaften von Silizium sehr gut bekannt sind, gibt es bei Nanostrukturen doch Überraschungen. So hat ein Team vom HZB-Institut Nanoarchitekturen für die Energieumwandlung sowie am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts erstmals gezeigt, wie sich Licht in einem Nanokegel aus Silizium verhält. Die Modellrechnungen und Experimente zeigen, warum diese geometrischen Strukturen weitaus besser als beispielsweise vergleichbar große Nanosäulen optisch zur Lumineszenz angeregt werden können. „Die Kegel wirken wie Flüstergalerien, nur nicht für Schall, sondern für Licht“, erklärt der Erstautor der Studie, Sebastian Schmitt.

### Starke Lumineszenz in den Nanokegeln

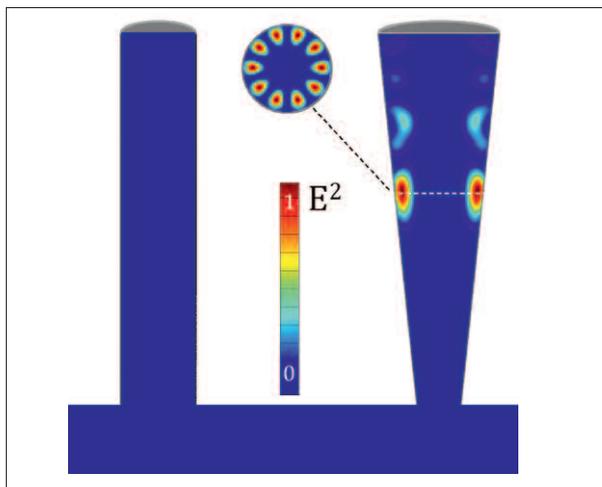
Im Experiment bestrahlten Schmitt und sein Kollege George Sarau einzelne Nanosäulen und Nanokegel aus Silizium mit rotem Laserlicht (660 Nanometer). Dann ermittelten sie die Strahlung, die die Probe als Lumineszenz zurückgab. Ohne Nanostrukturierung ist die Lumineszenz in Silizium sehr gering, da eine Anregung mit sichtbarem Licht in der Regel nicht dazu führt, dass Elektronen unter Abgabe von Infrarotlicht auf ihr ursprüngliches Niveau zurückfallen (indirekte Bandlücke). Die Nanostrukturen dagegen wandeln einen weitaus größeren Teil des eingestrahlt Lichts in elektromagnetische Strahlung im nahen Infrarotbereich um. Dieser Effekt ist in den Nanokegeln 200 Mal stärker als in den Nanosäulen. „Dies ist die höchste Lumineszenz-Verstärkung, die je in einer Siliziumstruktur gemessen wurde“, sagt Schmitt. Den Effekt kann das Team auch gut erklären: Denn mit numerischen Modellen lässt sich die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in den verschiedenen Geometrien einer Silizium-Nanostruktur berechnen. Dabei zeigt sich: Weil der Quer-



Nanostrukturen aus Silizium unter dem Rasterelektronenmikroskop. Der Durchmesser der Nanosäule beträgt 570 Nanometer. Der Nanokegel dagegen verjüngt sich von seinem oberen Durchmesser von 940 Nanometern bis zu 360 Nanometern an der Basis.



Eine Infrarotkamera erfasst die Lumineszenz (Abgabe von Licht) nach der optischen Anregung der beiden Nanostrukturen.



Die Energiedichte des Lumineszenzlichts (hier 1.027 Nanometer) im Querschnitt der Nanostrukturen lässt sich numerisch modellieren. Nur im Nanokegel entstehen Flüstergalerie-Moden. Dadurch ist die Lumineszenz 200 Mal stärker als in Nanosäulen.

schnitt im Nanokegel mit der Höhe zunimmt, gibt es mehrere Ebenen, in denen sich das Infrarotlicht konstruktiv überlagert und verstärkt, es bilden sich stehende Wellen aus, die eine erhöhte Anregung von Elektronen und damit

Abgabe von Lumineszenz ermöglichen. Dieser Effekt ist in Fachkreisen als Purcell-Effekt bekannt: Wenn sich eine Lichtquelle in einem optischen Resonator befindet, steigt die spontane Emission von Licht an. Die Nanokegel sind demnach hervorragende Resonatoren, eben optische Flüstergalerien für das Licht.

#### Design-Regeln für Nanostrukturen

„Solche Nanostrukturen aus einzelnen Kegeln sind nicht schwierig herzustellen“, erklärt Schmitt. Als neue Bauelemente wären sie sehr gut in die vorherrschenden CMOS-Halbleitertechnologien (complementary metal oxide semiconductor) integrierbar, zum Beispiel als Dioden, optoelektronische Schalter und Lichtsensoren. In Verbindung mit einem geeigneten optisch aktiven Medium könnten diese Strukturen sogar Laserlicht produzieren, vermuten die Physiker. Sie können aus solchen Erkenntnissen einfache Design-Regeln für Halbleiternanostrukturen ableiten, um die Anzahl und Wellenlängen der gespeicherten Modi zu kontrollieren und damit auch die Lumineszenz.

arö

Scientific Reports 5, 17089 (2015) (DOI: 10.1038/srep17089): Observation of strongly enhanced photoluminescence from inverted cone-shaped silicon nanostructures; S. W. Schmitt, G. Sarau and S. Christiansen

## TANDEM-SOLARZELLE MIT REKORDWIRKUNGSGRAD

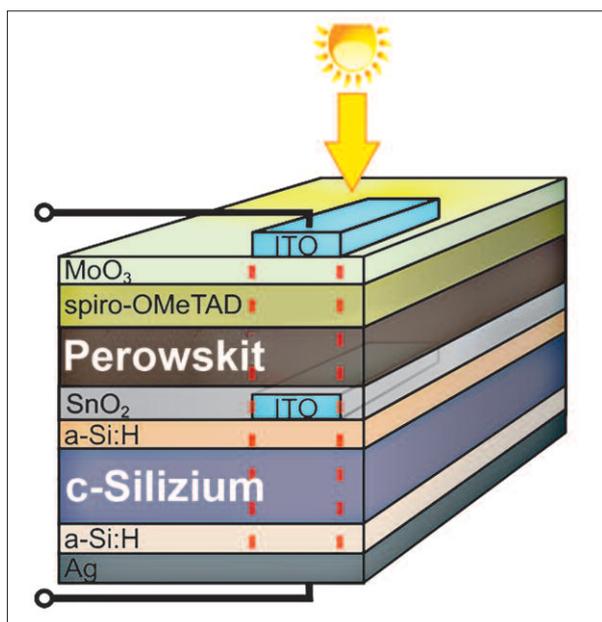
Teams aus dem HZB und der École Polytechnique Fédérale de Lausanne ist es gelungen, eine Silizium-Hetero-Solarzelle mit einer Perowskit-Solarzelle in einem Block zu kombinieren. Die **hybride Tandemzelle** erreichte einen Wirkungsgrad von 18 Prozent, perspektivisch könnten sogar 30 Prozent möglich sein.

**D**as organisch-anorganische Material Perowskit ist eine der größten Überraschungen in der Solarzellenforschung: In nur sechs Jahren hat sich der Wirkungsgrad von Perowskit-Solarzellen verfünffacht, darüber hinaus können Perowskit-Schichten aus Lösung hergestellt und in Zukunft kostengünstig auf großer Fläche gedruckt werden. Weil Perowskit-Schichten das Licht im blauen Spektrum sehr effizient nutzen, ist es interessant, sie mit Silizium-Schichten zu kombinieren, die vor allem das langwellige, rote und nahinfrarote Licht umwandeln. Doch praktisch ist der Bau solcher monolithischer Tandemzellen aus einer Abfolge von aufeinander abgeschiedenen Schich-

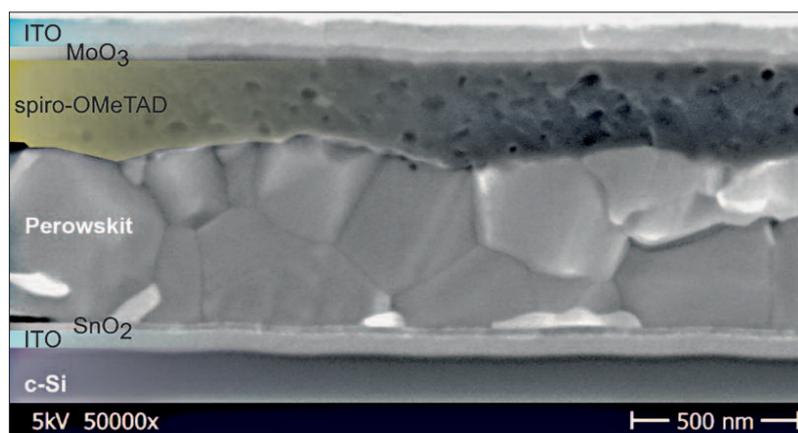
ten schwierig: Denn um hohe Effizienzen zu erhalten, werden die Perowskite üblicherweise auf Titandioxidschichten geschleudert, die zuvor bei knapp 500 Grad Celsius gesintert werden müssen. Solche Temperaturen vertragen jedoch die amorphen Siliziumschichten nicht, die bei Hetero-Siliziumzellen den kristallinen Siliziumwafer bedecken.

#### Neue funktionale Schichten

Ein Team um Prof. Dr. Bernd Rech und Dr. Lars Korte vom HZB-Institut für Siliziumphotovoltaik hat in Zusammenarbeit mit dem PVcomB und einer Gruppe um Prof. Dr. Michael Graetzel von der École Polytechnique Fédérale de Lausanne



Der schematische Aufbau der hybriden Tandemzelle aus Silizium und Perowskit.



Diese REM-Aufnahme zeigt einen Querschnitt durch den Aufbau der Tandemzelle. Die Basis bildet eine Silizium-Heterozelle. Darauf wurde eine sehr dünne Schicht transparentes Zinndioxid abgeschieden, die mit Perowskit (500 nm) sowie dem Lochleitermaterial spiro-OMeTAD (300 nm) bedeckt wurde. Dünnes  $\text{MoO}_3$  dient als Schutzschicht zwischen diesem Lochleiter und der transparenten ITO-Topelektrode.

(EPFL) erstmals eine solche monolithische Tandemzelle hergestellt: Es gelang, auf der Hetero-Siliziumzelle mit einem schonenden Verfahren eine Zinndioxid-Lage bei kleinen Temperaturen abzuscheiden. Auf diese Unterlage konnte dann eine dünne Perowskit-Schicht aufgeschleudert und mit einem Lochleitermaterial bedeckt werden. Ein weiteres Schlüsselement dieser Zellarchitektur ist der transparente Topkontakt: Die dafür notwendigen Metalloxide werden durch Kathodenzerstäubung (Sputtern) abgeschieden und würden unter üblichen Bedingungen die sensible Perowskit-Schicht sowie den Lochleiter zerstören. Hier hat das Team des HZB das Verfahren modifiziert und eine transparente Schutzschicht eingebaut.

### Hoher Wirkungsgrad und hohe Leerlauf-Spannung auch für andere Anwendungen interessant

Diese Tandemzelle erreichte mit 18 Prozent einen Wirkungsgrad, der knapp 20 Prozent höher als die Wirkungsgrade der einzelnen Zellen ist. Die Leerlauf-Spannung beträgt 1,78 Volt. „Damit wäre diese Materialkombination sogar auch für die Erzeugung von Wasserstoff aus Sonnenlicht interessant“, sagt Dr. Steve Albrecht, Erstautor der Arbeit und Post-Doc bei Bernd Rech. Er hat das Proben-design der Tandemzelle entwickelt und die Kooperation mit der EPFL koordiniert. „Der gemessene Wirkungsgrad ist mit 18 Prozent zwar schon sehr gut, aber aktuell geht noch Licht an den Oberflächen verloren“, erklärt Albrecht, der weitere Verbesserungen plant. So könnten strukturierte Folien auf der Vorderseite Licht einfangen und in die Zelle einkoppeln, was den Wirkungsgrad weiter steigern würde. Auch die Silizium-Heterosolarzelle, die hier die Bottom-Zelle und gleichzeitig das Substrat für die Perowskit-Topzelle bildet, bietet noch Potenzial für Verbesserungen. „Diese Zelle wird für das Perowskit-Silizium-Tandem im Moment noch auf einem glatten Silizium-Wafer hergestellt.

Durch eine Strukturierung des Wafers mit Lichteinfangstrukturen, zum Beispiel Zufallspyramiden, könnte die Effizienz bis auf 25 oder sogar 30 Prozent gesteigert werden“, sagt Lars Korte, Leiter der Arbeitsgruppe Silizium-Hetero-Kontaktsysteme am Institut für Siliziumphotovoltaik.

### Integration in bestehende industrielle Produktionsverfahren

Fast noch wichtiger als maximale Wirkungsgrade aber ist die Integration in bestehende Technologien und Produktionsverfahren: „Aktuell beherrscht die Silizium-Technologie 90 Prozent des Marktes, das heißt, es gibt viele etablierte Produktionsanlagen für Siliziumzellen“, sagt Prof. Dr. Bernd Rech. „Die Perowskit-Schichten könnten den Wirkungsgrad erheblich steigern. Dafür müssten die

Produktionsverfahren nur um wenige Schritte erweitert werden. Deshalb ist unsere Arbeit auch für die Industrie extrem interessant. Allerdings müssen die Probleme der Langzeitstabilität und des Bleigehalts von Perowskit-Solarzellen durch künftige Forschung gelöst werden.“

rk

Energy Environ. Sci., 2016,9, 81-88 (DOI: 10.1039/C5EE02965A): Monolithic Perovskite/Silicon-Heterojunction Tandem Solar Cells Processed at Low Temperature; S. Albrecht, M. Saliba, J. P. Correa Baena, F. Lang, L. Kegelmann, M. Mews, L. Steier, A. Abate, J. Rappich, L. Korte, R. Schlatmann, M. K. Nazeeruddin, A. Hagfeldt, M. Grätzel and B. Rech

## PARTNER FÜR DIE INDUSTRIELLE QUALITÄTSSICHERUNG

Der Fensterhersteller VELUX bietet **Dachfenster mit einem Solarmodul** an, das eine elektrische Jalousie mit Strom versorgt. Bei der Qualitätssicherung der Module greift das dänische Unternehmen auf die langjährigen Erfahrungen des PVcomB bei der Analytik und Entwicklung von Modulen zurück.

**A**m Kompetenzzentrum Dünnschicht- und Nanotechnologie für Photovoltaik Berlin (PVcomB) werden Dünnschicht- und Photovoltaiktechnologien und -produkte gemeinsam mit der Industrie entwickelt. Die Kooperationsprojekte mit internationalen Unternehmen tragen zum Technologie- und Wissenstransfer bei und fördern auf diese Weise die Anwendung der Solarenergie auf dem Markt. Einer der Partner ist der Fensterhersteller VELUX. Das Unternehmen verkauft in großen Stückzahlen Dachfenster, in die ein solarenergiebetriebenes, energieautarkes Beschattungssystem eingebaut ist. Die Technik kommt ohne Stromkabel aus und kann auch nachträglich ohne großen Aufwand eingebaut werden.



Dank einer integrierten Photovoltaik-Komponente, die am HZB evaluiert wurde, verfügt das Dachfenster von VELUX über eine energieautarke Jalousie.

### 1. Phase: Qualitätssicherung

VELUX hat im Jahr 2014 das PVcomB damit beauftragt, die Qualitätsüberwachung zu unterstützen und zur Produktverbesserung an der PV-Komponente beizutragen. Das Institut konnte dazu auf seine hochmoderne Ausstattung und Kompetenz für die Analyse von Dünnschicht-Materialien, Solarzellen und Modulen zurückgreifen. Im Mittelpunkt steht dabei die Elektrolumineszenz-Spektroskopie. Bei dieser sehr empfindlichen Methode wird das zu untersuchende Photovoltaikmodul durch elektrischen Strom zum Leuchten angeregt. In Kombination mit mikroskopischen Analysen erhielten die Wissenschaftler um Dr. Björn Rau Hinweise auf



Das PVcomB stellt hochmoderne Anlagen zur Analyse von Solarmodulen bereit.

schlechte Kontakte oder Materialdefekte wie Kurzschlüsse in Halbleitern oder Isolatoren. Schließlich wurden die Ergebnisse der Evaluierungen für VELUX analysiert und bewertet.

### 2. Phase: Evaluation alternativer Zulieferer

In einer zweiten Phase des Kooperationsprojekts geht es darum, alternative Modulhersteller zu finden. Für diesen Charakterisierungsauftrag entwickelten die Ingenieure am PVcomB eine Systematik, die es ermöglicht, bereits im Vorfeld gute von fehleranfälligen Solarmodulen zu unterscheiden. Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit kam neben der Lumineszenzmessung die Lock-in-Thermographie zum Einsatz. Dabei wird ein Solarmodul durch eine angelegte elektrische Spannung oder durch eine gezielte Beleuchtung in spezielle Betriebszustände versetzt. Mit einer hochauflösenden Infrarot-Kamera können Hotspots detektiert werden, an denen es punktuell sehr heiß wird – ein Zeichen für einen Kurzschluss, der im Einsatz des Moduls zu Problemen führen wird. „Da wir schon viele Jahre Solarmodule entwickeln und selbst produzieren, können wir am PVcomB sehr gut beurteilen, welche Fehler im Material welche Ursache haben“, erläutert Rau. „Dank unserer langjährigen Erfahrungen mit der Produktionstechnik auf der einen und den Analysemethoden auf der anderen Seite, sind wir für solche Kooperationsprojekte mit der Industrie der ideale Partner.“ *tm*

## UNSICHTBARE SOLARMODULE IN DISPLAYS UND FENSTERN

**Semitransparente Solarmodule** der Firma Sunpartner Technologies könnten die Stromversorgung von tragbaren Geräten sichern. Sie sind unsichtbar und können überall dort verwendet werden, wo Glas verbaut wird. Die Technologie steckt noch in den Kinderschuhen, aber das PVcomB hilft dabei, sie zur Marktreife zu bringen.

Seit Längerem arbeiten Wissenschaftler an der Entwicklung quasi durchsichtiger Solarmodule. Diese könnten Fenster in Gebäuden oder Autos sowie andere Glasoberflächen in Energieerzeuger verwandeln: Bisher war die erzeugte Strommenge solcher Module allerdings zu gering, als dass man sie auf den Markt hätte bringen können. Das könnte sich in naher Zukunft ändern, denn die Technik wurde in jüngster Zeit entscheidend weiterentwickelt. So hat das französische Unternehmen Sunpartner Technologies eine Technologie entwickelt, mit der sich eine dünne Solarzelle auf einem Glas integrieren lässt, etwa zwischen dem berührungsempfindlichen Touchscreen und dem LCD-Bildschirm eines Telefons, ohne das dargestellte Bild zu verschleiern.

Diese Innovation trägt den Markennamen „Wysips“ – ein Akronym für „What you see is photovoltaic surface“. Man erreicht damit ein Displaybild mit der vollen Helligkeit herkömmlicher Geräte – und trotzdem fungiert dieselbe Fläche als Photovoltaik-Modul“, beschreibt Dr. Bernd Stannowski vom Kompetenzzentrum Dünnschicht- und Nanotechnologie für Photovoltaik Berlin (PVcomB) das Prinzip. „Diese Komponente könnte alle durchsichtigen Oberflächen in energieerzeugende Träger verwandeln.“ „Bei Smart Windows setzt man auf eine autonome Energieversorgung“, erklärt er. „Das System kann man unter anderem in Flugzeugen einsetzen, sodass die Passagiere nicht mehr ein Rollo herunterziehen müssen, sondern die Verdunklung einfach über einen Knopf regeln können“.

### Technologiekooperation mit Blick auf den Markt

Das PVcomB ist Entwicklungspartner von Sunpartner Technologies. „Das Unternehmen kann über diese Kooperation auf unsere umfangreiche Kompetenz im Bereich des Prozessierens und Analysierens dünner Schichten und Solarzellen zurückgreifen“, erläutert Stannowski, der das Projekt am PVcomB leitet. Die gemeinsame Aufgabe sei es, den Wirkungsgrad, die Qualität und auch die Produktionsgeschwindigkeit weiter zu erhöhen, um die Techniken für einen Einsatz im Markt der Unterhaltungs- und Haushaltselektronik und für Smart Windows zu optimieren. Die



Die Entwicklung quasi durchsichtiger Solarmodule ist vor allem für die Hersteller von mobilen Geräten wie Smartphones, Tablets und Smart Watches von enormer Bedeutung. Nutzer könnten dann tagelang mobile Geräte verwenden ohne auf eine Steckdose zum Aufladen angewiesen zu sein.

Berliner Ingenieure und Wissenschaftler experimentieren dabei mit Silizium- und CIGSe-Solarzellen.

Das PVcomB agiert in diesem Projekt aber nicht nur als Prozessentwickler, sondern auch als Partner, um Photovoltaik-Module in kleinen Stückzahlen in Berlin herzustellen, damit sie dann in Frankreich in einer Pilotlinie mittels Photolithographie weiterbearbeitet werden können. „Hier ist es vor allem wichtig, dass eine gleichbleibend hohe Qualität erzielt wird. Das PVcomB ist dafür ein zuverlässiger Partner“, erläutert Dr. Björn Rau, Technologieleiter am PVcomB.

tm

## KÜNSTLICHE PHOTOSYNTHESE MIT EFFIZIENZREKORD

Einem internationalen Team ist es mit Beteiligung des HZB gelungen, erstmals seit 17 Jahren den Wirkungsgrad für die **direkte solare Wasserspaltung** zu steigern. Die Forscher nutzten dafür eine Tandem-Solarzelle, deren Oberflächen sie gezielt modifiziert hatten.

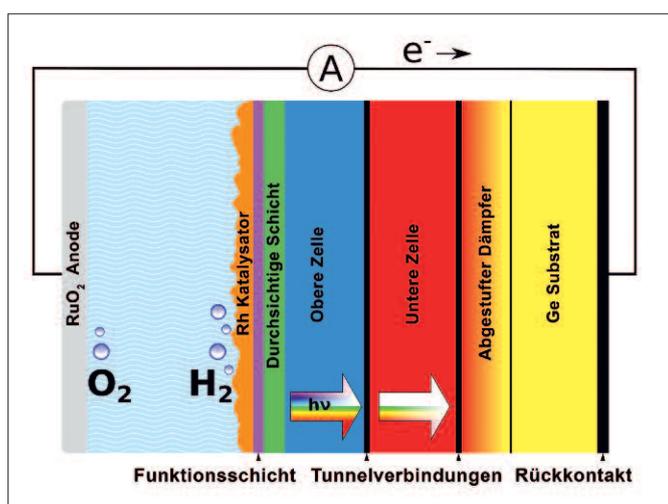
Solarenergie ist zwar reichlich verfügbar, aber leider nicht stets und überall. Eine besonders interessante Speicherlösung ist die künstliche Photosynthese. Was jedes Blatt kann, nämlich Sonnenlicht in chemische Energie umwandeln, das gelingt auch mit künstlichen Systemen auf Halbleiterbasis: Dabei spaltet die elektrische Leistung, die das Sonnenlicht in einzelnen Halbleiterkomponenten erzeugt, Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff auf. Wasserstoff besitzt eine hohe Energiedichte, ist vielseitig verwendbar und könnte fossile Brennstoffe umweltfreundlich ersetzen. Bisher

wert deutlich zu übertreffen. Matthias May, der für die TU Ilmenau und das HZB-Institut für Solare Brennstoffe arbeitet, hat in seiner ausgezeichneten Promotionsarbeit dafür knapp hundert Proben bearbeitet und vermessen. Die Grundbausteine sind Tandemsolarzellen aus sogenannten III-V-Halbleitern. Mit einem jetzt patentierten photoelektrochemischen Verfahren gelang es May, bestimmte Oberflächen dieser Halbleitersysteme so zu modifizieren, dass sie ihre Funktion bei der Wasserspaltung besser erfüllen.

### Stabilität enorm verbessert

„Wir haben insbesondere die Aluminium-Indium-Phosphid-Schichten *in situ* elektronisch wie chemisch passiviert und damit effizient an die Katalysatorschicht für die Wasserstoff-erzeugung angekoppelt. Dabei konnten wir die Oberflächenzusammensetzung auf der Subnanometerskala kontrollieren“, erklärt May. Auch bei der Langzeitstabilität gelangen riesige Fortschritte: Anfänglich hielten die Proben nur wenige Sekunden durch, bevor ihre Leistung einbrach, nach etwa einem Jahr Optimierung bleiben sie mehr als 40 Stunden lang stabil. Weitere Schritte in Richtung Langzeitstabilität sind in Vorbereitung – 1.000 Stunden sind das nächste Ziel. „Prognosen zeigen, dass die Erzeugung von Wasserstoff aus Sonnenlicht mit Hocheffizienz-Halbleitern ab einer Effizienz von 15 Prozent wirtschaftlich konkurrenzfähig zu fossilen Energieträgern werden könnte. Das entspricht einem Preis von etwa vier US-Dollar pro Kilogramm Wasserstoff“, sagt Prof. Thomas Hannappel, Fachgebiet Photovoltaik an der TU Ilmenau, der die Arbeit mit betreut hat. Und Prof. Hans-Joachim Lewerenz vom Joint Center for Artificial Photosynthesis aus dem California Institute of Technology sagt: „Da sind wir nun schon nah dran. Wenn es uns gelingt, die Ladungsträger-Verluste an den Grenzflächen noch etwas stärker zu reduzieren, könnten wir mit diesem Halbleitersystem sogar mehr als 17 Prozent der einfallenden Solar-energie chemisch in Form von Wasserstoff speichern.“ arö

Nature Communications, 6:8286, (DOI: 10.1038/ncomms9286): Efficient direct solar-to-hydrogen conversion by *in situ* interface transformation of a tandem structure; M. M. May et. al



Die neue Zelle wandelt circa 14 Prozent der einfallenden Solarenergie in Wasserstoff um.

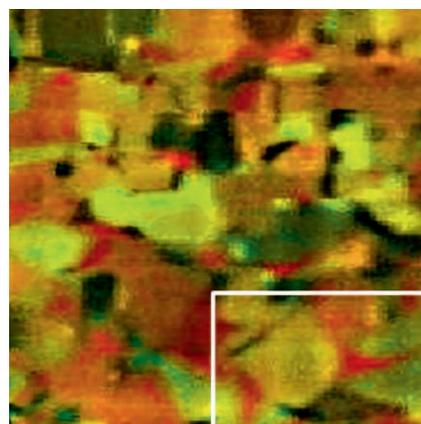
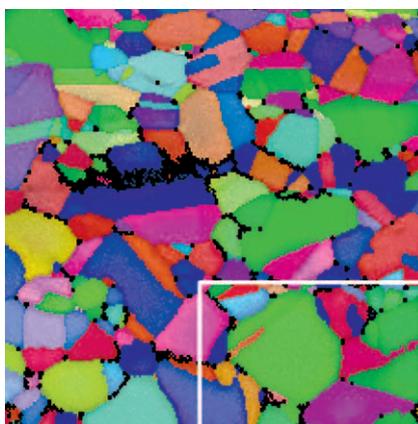
scheitert die industrielle Herstellung von „Sonnen-Wasserstoff“ jedoch an den Kosten, weil der Wirkungsgrad der künstlichen Photosynthese zu gering ist. Die wichtigsten Wissenschaftsstandorte der Welt forschen daher seit vielen Jahren daran, die bestehende Bestmarke für künstliche Photosynthese von 12,4 Prozent, die seit 17 Jahren vom National Renewable Energy Laboratory in den USA gehalten wird, zu knacken. Dem Team aus der Technischen Universität Ilmenau, dem HZB, dem California Institute of Technology sowie dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg ist nun gelungen, diesen Rekord-

## MIKROSTRUKTUREN IN POLYKRISTALLEN EINFACHER DARSTELLEN

Ein gemeinsames Team aus dem HZB und der Bundesanstalt für Materialforschung (BAM) hat demonstriert, wie sich mit **Raman-Mikrospektroskopie** einfach und günstig ermitteln lässt, wie Kristallorientierungen in polykristallinen Materialien über größere Bereiche verteilt sind.

Die meisten festen Materialien liegen als Polykristalle vor. Wie sich diese Mikrokristalle in der Probe orientieren, kann für die Eigenschaften des Materials sehr wichtig sein. Um die Orientungsverteilung über einen größeren Probenausschnitt zu bestimmen, ist in der Regel ein Rasterelektronenmikroskop erforderlich. Nach aufwändiger Vorbehandlung wird die Probe im Vakuum mit einem Elektronenstrahl abgetastet und mittels Rückstreu-Elektronenbeugung (electron backscatter diffraction, kurz EBSD) untersucht. Ein Team aus dem HZB um Dr. Daniel Abou-Ras hat zusammen mit Dr. Thomas Schmid von der BAM gezeigt, dass vergleichbare Verteilungsbilder auch mit Raman-Mikrospektroskopie gelingen. Diese Methode erfordert lediglich einen optischen Mikroskopieaufbau, jedoch keine aufwändige Probenpräparation und kann auch auf nicht vakuumtaugliche Materialsysteme angewandt werden. Als Modellsystem untersuchten die Wissenschaftler eine polykristalline  $\text{CuInSe}_2$ -Dünnschicht mit beiden Methoden. Dabei konnten sie zeigen, dass die experimentell ermittelten Raman-Intensitäten über einem ausgewählten Flächenausschnitt sehr gut mit den – unter Verwendung der lokalen Orientierungen – aus der EBSD-Map berechneten Raman-Intensitäten übereinstimmten. „Die Probe wurde mit Schrittweiten von 200 Nanometern mit einem Laserstrahl abgetastet, und die Raman-Signale wurden gemessen. Um diese Messung auf Flächen von mehreren Hundert Quadratmikrometern durchzuführen, mussten wir allerdings die Probenumgebung sehr sorgfältig kontrollieren und über Stunden stabil halten“, erklärt Abou-Ras. Die Anwendung der Raman-Mikrospektroskopie für Orientungsverteilungen ist prinzipiell für alle polykristallinen Proben möglich, ob anorganisch oder organisch, solange diese Raman-aktiv sind.

arö



Links: Wie sich die Kristallite in einer  $\text{CuInSe}_2$ -Dünnschicht orientieren, lässt sich auch mit Raman-Mikrospektroskopie kartieren. Rechts: Der gleiche Ausschnitt dieser Probe mit EBSD kartiert.

### RAMAN-SPEKTROSKOPIE

Die Raman-Spektroskopie, benannt nach dem indischen Physiker und Nobelpreisträger Chandrasekhara Venkata Raman, basiert auf dem Streuverhalten von Licht, mit dessen Hilfe molekulare Schwingungen erfasst werden können. Jede Art von Molekülen oder funktionelle Gruppen davon erzeugen eindeutig unterscheidbare Schwingungen. Ein Raman-Spektrum kann daher als eine Art charakteristischer „optischer Fingerabdruck“ einer molekularen Spezies interpretiert werden, was die Identifikation organischer, anorganischer oder biologischer Komponenten ermöglicht. Für die Untersuchung biologischer Proben hat sich die Raman-Mikrospektroskopie als besonders wertvoll erwiesen. Durch die Kombination eines Raman-Aufbaus mit einem Mikroskop ist es sehr einfach möglich, Strukturen im Submikrometer-Bereich zu analysieren, das heißt nicht-invasiv Raman-Bilder mit chemischem Kontrast und damit hoher molekularer Selektivität aufzunehmen.

Scientific Reports 5, 18410 (2015) (DOI: 10.1038/srep18410): Orientation-distribution mapping of polycrystalline materials by Raman microspectroscopy; N. Schäfer, S. Levenco, D. Abou-Ras and T. Schmid

## HEMF: NEUE HELMHOLTZ-LABORPLATTFORM

Sechs Helmholtz-Zentren richten eine gemeinsame Infrastruktur für die **Entwicklung neuartiger Energiematerialien** ein – HEMF. Sie wird auch externen Nutzergruppen aus Universitäten und außeruniversitären Instituten aus dem In- und Ausland sowie der Industrie zur Verfügung stehen.

Mitte 2015 hat der Helmholtz-Senat den Aufbau einer groß angelegten Infrastruktur für die Synthese und Entwicklung neuartiger Materialsysteme zur Energieumwandlung und -speicherung beschlossen. Das Gesamtvolumen der Investition beträgt circa 46 Millionen Euro und erstreckt sich über einen Zeitraum von fünf Jahren bis Ende 2020. Die Einrichtung der Helmholtz Energy Materials Foundry (HEMF) wird vom HZB koordiniert, fünf weitere Helmholtz-Zentren beteiligen sich an Konzeption und Aufbau: Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Forschungszentrum Jülich, Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG), Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) sowie das Karlsruher Institut für Technologie (KIT).



Mit dem neuen Energy Materials *In situ* Laboratory (EMIL) an BESSY II bringt das HZB seine Stärken in diesem Bereich in die neue Laborplattform HEMF ein.

Im Rahmen von HEMF werden an den sechs beteiligten Helmholtz-Zentren mehrere, sich ergänzende Laboratorien mit hervorragender und einzigartiger Ausstattung aufgebaut. Der wissenschaftliche Fokus beim Maßschneidern von Energiematerialien liegt dabei auf Fragestellungen mit Bezug zu solaren Brennstoffen, Solarzellen, Brennstoffzellen, Batteriesystemen sowie thermoelektrischen und thermochemischen Materialien. Ein übergreifendes Thema sind neuartige Katalysatoren, die bei der Energieumwandlung und -speicherung eingesetzt werden.

### Breites Leistungsspektrum

Das Leistungsspektrum der HEMF-Plattform reicht vom Design neuartiger Materialsysteme über *in situ*- und *in operando*-Analysen von Prozessen bei ihrer Synthese bis zur dreidimensionalen Nanostrukturierung dieser Materialien, um ihre Eigenschaften gezielt zu verändern. Außerdem werden Methoden entwickelt, um neuartige Materialien zu verarbeiten, innovative Prototypen für bestimmte Anwendungen herzustellen und ihre Eigenschaften und Leistungsfähigkeit unter Dauerbelastung zu untersuchen. „Dieser ganzheitliche Ansatz, ermöglicht effiziente Feedback-Schleifen zwischen Synthese, Charakterisierung und der Evaluation der Endprodukte. Damit beschleunigen wir die wissenschaftliche Entwicklung“, sagt Prof. Anke Kaysser-Pyzalla, wissenschaftliche Geschäftsführerin des HZB. Am HZB sind insbesondere Synthese-Laboratorien für Perowskit-Dünnschichten, Nanopartikel für Katalyse und elektrochemische Speicher sowie Einrichtungen für die Nanostrukturierung von Materialien geplant. Am neu errichteten Energy Materials *In situ* Laboratory (EMIL) an BESSY II werden Methoden entwickelt, um elektrochemische Prozesse an katalytischen und heterogenen Grenzflächen zu untersuchen. Darüber hinaus werden auch Test-Labore eingerichtet, um neue Materialsysteme unter realen Bedingungen zu prüfen. Das HZB arbeitet dafür auch mit der Max-Planck-Gesellschaft zusammen, die durch das Fritz-Haber-Institut, Berlin, und das MPI für Chemische Energiekonversion (CEC) in Mülheim vertreten ist.

### Internationale Ausrichtung

Die HEMF-Plattform wird als internationale Nutzereinrichtung betrieben. Die Laboratorien stehen damit auch Forschergruppen aus Universitäten, außeruniversitären Forschungseinrichtungen oder der Industrie zur Verfügung. Die Koordination des Nutzerbetriebs übernimmt das HZB, das auf diesem Gebiet über große Erfahrung verfügt und bei seinen eigenen Großgeräten, BESSY II und BER II, einen hervorragenden Nutzerservice aufgebaut hat, von dem jährlich etwa 3.000 externe Messgäste profitieren. HEMF baut auch auf einem Konzept des kalifornischen Berkeley

Labs auf, wo eine „Molecular Foundry“ als Infrastruktur für internationale Nutzergruppen eingerichtet wurde. „Mit der HEMF-Plattform verstärkt die Helmholtz-Gemeinschaft ihre Kompetenzen in der Materialsynthese von Werkstoffen, die für die Energiewende unverzichtbar sind. Mit dieser gemeinsamen Infrastruktur können die beteiligten Helmholtz-Zentren ihr Forschungspotenzial einbringen, damit wir in Zukunft die Energie, die wir brauchen, sicher und

umweltfreundlich zur Verfügung stellen und nutzen können. Die Plattform wird zugleich neue attraktive Kooperationspartner anziehen, die die gleichen Forschungsziele verfolgen“, führt Kaysser-Pyzalla weiter aus. Das Vorhaben ist in dieser Größenordnung einzigartig und wird dazu beitragen, dass die Gruppe der Helmholtz-Zentren bei der Erforschung und Entwicklung von Energiematerialien auch im internationalen Vergleich einen wegweisenden Beitrag leisten kann. arö

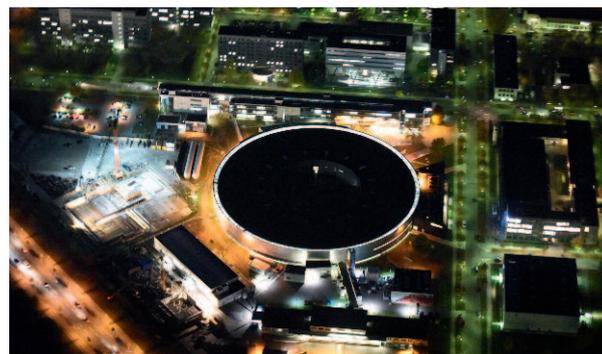
## HZB VERSTÄRKT DIE KATALYSEFORSCHUNG

Die Einstein-Stiftung fördert seit 2016 ein neues **Einstein-Zentrum für Katalyse (EC<sup>2</sup>)**, an dem sich neben dem HZB auch die Technische Universität Berlin und mehrere außeruniversitäre Einrichtungen aus Berlin beteiligen.

**K**atalyse ist zentrales Zukunftsthema, ob bei der Energiewende oder bei der Verarbeitung von Rohstoffen: Wenn wir in Zukunft Ressourcen effizienter und nachhaltiger nutzen wollen, sind hervorragende Katalysatoren unverzichtbar. Deshalb verstärkt auch das HZB die Katalyseforschung und arbeitet dabei gezielt mit Kooperationspartnern zusammen. Aus dem HZB wirkt Prof. Dr. Emad Aziz, Leiter des HZB-Instituts für Methoden der Materialforschung, am neuen Einstein-Zentrum für Katalyse mit. Sein Team bringt insbesondere Expertise in der Analytik ultraschneller Prozesse bei katalytischen Reaktionen ein. Im Einstein-Zentrum für Katalyse (EC<sup>2</sup>) sollen Methoden entwickelt werden, die einen tieferen Einblick in chemische und biologische Katalysatoren ermöglichen. Insbesondere die Dynamik von Katalyseprozessen will man damit besser verstehen. „Der Aufbau des institutionenübergreifenden Einstein-Zentrums für Katalyse ist ein echter Meilenstein für die Katalyseforschung. Das HZB wird sich zukünftig noch stärker im Rahmen der Forschung an Energiematerialien in der Katalyseforschung engagieren“, sagt die wissenschaftliche Geschäftsführerin des HZB, Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla.

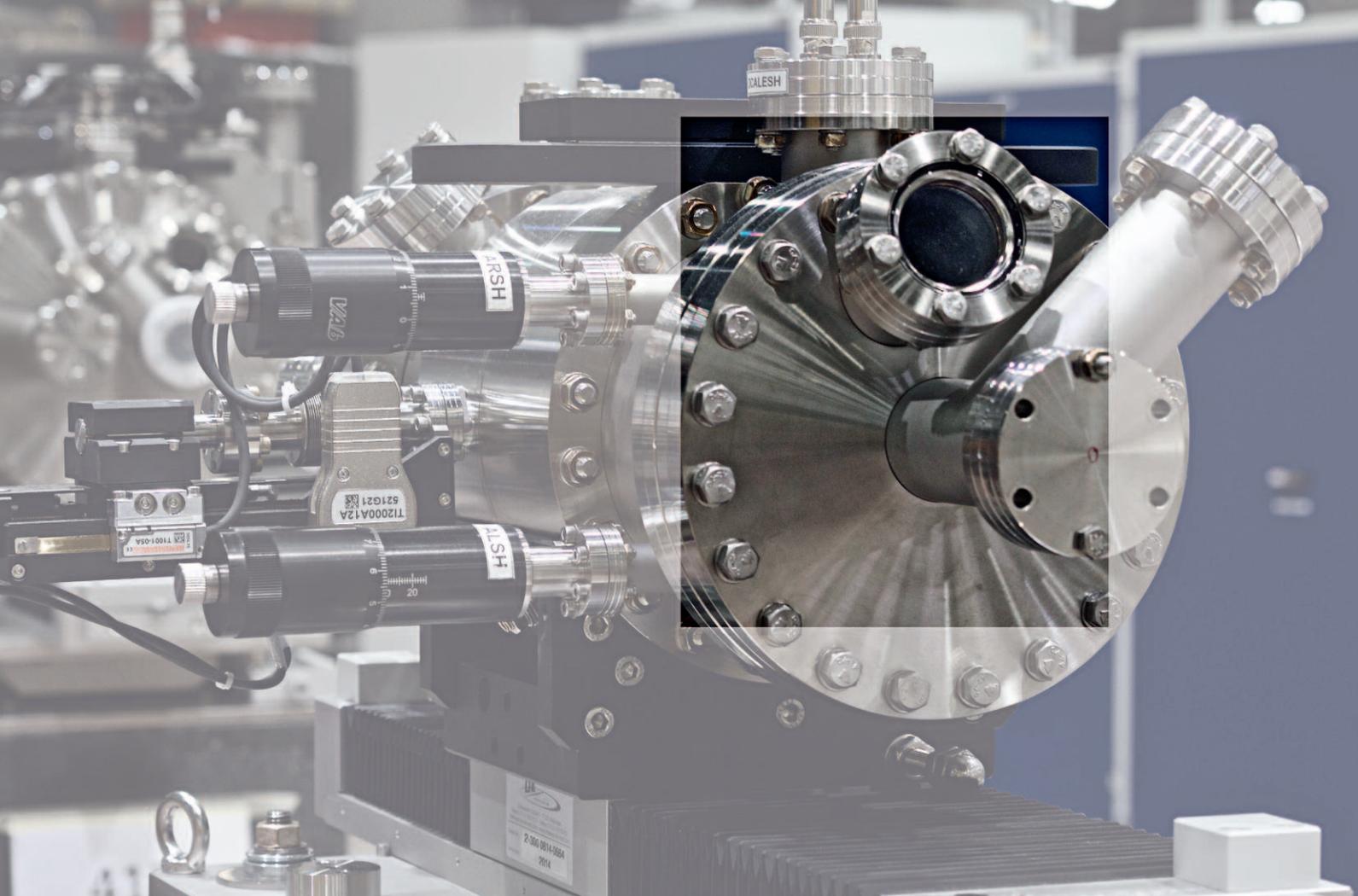
### BESSY II ermöglicht Spitzenanalytik

Das neue Einstein-Zentrum baut auf dem Exzellenzcluster der TU Berlin „Unifying Concepts in Catalysis (UniCat)“ auf. Zentrale Partner des neuen Einstein-Zentrums sind neben dem HZB das Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, das Leibniz-Institut für Molekulare Pharmakologie Berlin, das Leibniz-Institut für Analytische Wissenschaften Berlin, sowie das UniCat-BASF Joint Lab. Sprecher des neuen Einstein-Zentrums ist Prof. Dr. Matthias Driß, vom Fachgebiet Metallorganische Chemie und Anorganische



Mit der Spitzenanalytik an BESSY II werden neue Methoden entwickelt, um die elektronische Struktur von katalytisch aktiven Molekülen zu untersuchen.

Materialien der TU Berlin. „Um die Dynamik von aktiven Reaktionszentren mit hoher zeitlicher wie räumlicher Auflösung bestimmen zu können, brauchen wir das HZB mit seiner Spitzenanalytik an BESSY II als Partner“, sagt Driß. Das HZB-Institut für Methoden der Materialentwicklung arbeitet an neuen experimentellen Methoden, die Licht im Röntgenbereich oder im extremen UV-Bereich nutzen. „Damit stellen wir neue Werkzeuge bereit, um die elektronische Struktur von katalytischen Molekülen und die ultraschnellen Prozesse, die während der Katalyse ablaufen, unter realistischen Bedingungen wie Raumtemperatur oder Normaldruck zu untersuchen“, erklärt Aziz: „Auch Dr. Tristan Petit und Dr. Annika Bande, deren Gruppen durch ein Freigeist-Stipendium der Volkswagenstiftung gefördert werden, profitieren von dem großen Netzwerk zur Katalyseforschung in Berlin.“ Das neue Einstein-Zentrum soll für zunächst fünf Jahre bis Ende 2020 gefördert werden. arö



# METHODENENTWICKLUNG FÜR DIE FORSCHUNG MIT WEICHER RÖNTGENSTRAHLUNG

**1.160 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter** waren 2015 durchschnittlich beim Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie beschäftigt, inklusive der Auszubildenden. Mit 332 Mitarbeiterinnen lag der Frauenanteil unter den Beschäftigten am HZB bei 28,6 Prozent.

**15 Jugendliche** erhielten 2015 einen neuen Ausbildungsvertrag am HZB. Ende 2015 befanden sich insgesamt 50 Jugendliche in neun Ausbildungsberufen am HZB, darunter zwölf Bachelors of Science (BA) Technische Informatik in Verbindung mit der Fachhochschule für Wirtschaft Berlin.

**447 ISI- oder SCOPUS-zitierte Publikationen** wurden 2015 von den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am HZB veröffentlicht – darunter 105 im Programmanteil „Erneuerbare Energien“, 67 im Programmanteil „Energieeffizienz, Materialien und Ressourcen“ sowie 62 im Programmanteil „Von Materie zu Materialien und Leben“.

**185 Doktoranden** wurden 2015 am HZB betreut. Insgesamt wurden am HZB 27 Doktorarbeiten, eine Diplomarbeit, 41 Master-Arbeiten, 31 Bachelor-Arbeiten und zwei Studienarbeiten abgeschlossen.

## DAS INNERE VON MATERIALIEN FILMEN

Die EDDI-Beamline an BESSY II kann seit Ende 2015 hochaufgelöste dreidimensionale Bilder des mikroskopischen Aufbaus von Proben erstellen. Zeitgleich kann wie zuvor **Röntgenbeugung (Energie-dispersive Diffraction)** durchgeführt werden, die Rückschlüsse auf die kristalline Struktur des Materials zulässt.

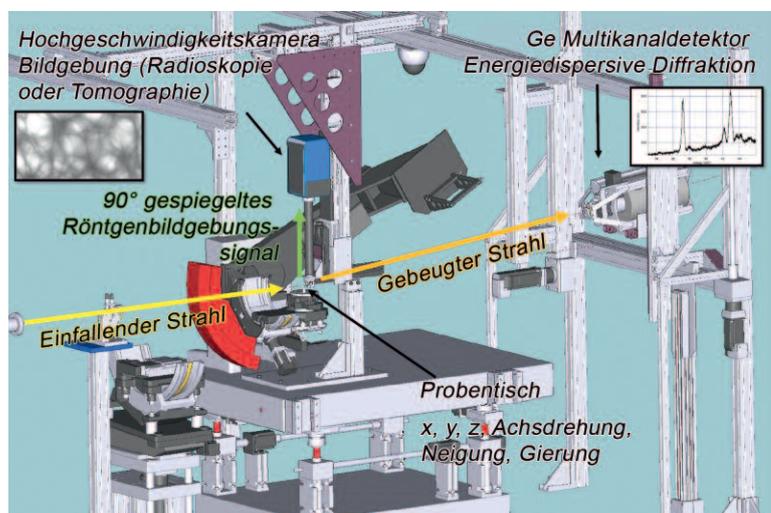
Die beiden Beamline-Verantwortlichen Dr. Catalina Jiménez und Dr. Francisco García-Moreno haben die Verbesserung der Beamline Ende 2013 vorgeschlagen und in der Folgezeit erfolgreich umgesetzt. EDDI nutzt das komplette Energiespektrum der BESSY II-Röntgenpulse aus, um damit rasche Beugungsbilder der Proben zu erstellen. Sie geben Aufschluss über den kristallinen Aufbau und den Abstand der Atome in der Probe. Ein Teil des Röntgenlichts geht jedoch ungenutzt durch die Probe hindurch. Dieser Strahl kann nun über einen Szintillator-Kristall in sichtbares Licht umgewandelt und in einer Kamera aufgezeichnet werden. Durch Drehen der Probe erhält man dreidimensionale Abbildungen, die sogenannte Tomografie. Die Umsetzung war nicht trivial: So musste der Messkopf mit dem Szintillator-Kristall nahe der Probe Platz finden, ohne die Strahlführung der Diffraction zu behindern. „Wir haben dafür eng mit der HZB-Werkstatt zusammengearbeitet“, berichtet García-Moreno.

### Bis zu vier Tomografien pro Sekunde

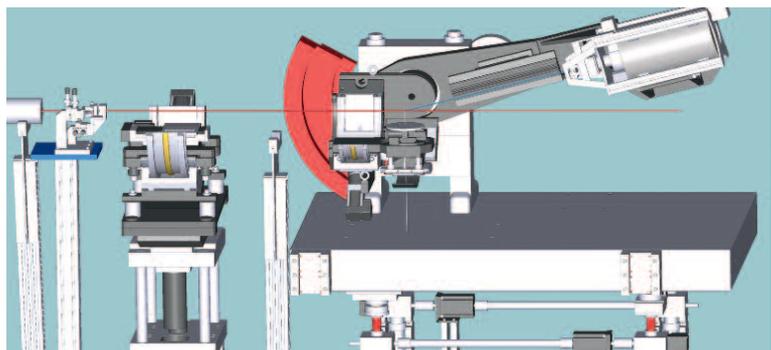
Der Probentisch ist drehbar und besitzt Schleifkontakte, sodass zum Beispiel Batterien während des Ladeprozesses untersucht werden können. Auch gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Probe während der Messung aufzuheizen oder abzukühlen. „Damit können wir zum Beispiel beobachten, welche Veränderungen in Batterien beim Aufladen ablaufen, wie sich Wasserstoff in Stahl einlagert, aber auch viele andere Fragen an Energiematerialien untersuchen“, erklärt Catalina Jiménez.

Inzwischen hat das Team gezeigt, dass die Erweiterung sogar noch leistungsfähiger ist, als erwartet: „Wir sind ursprünglich davon ausgegangen, dass eine vollständige Tomografie einer Probe mehrere Sekunden dauert. Doch

jetzt schaffen wir sogar gleichzeitig bis zu eine Tomografie und ein Diffractionsspektrum pro Sekunde oder bis zu vier Tomografien pro Sekunde. Das heißt, wir können auch schnelle Veränderungen in Proben sehr gut beobachten. Wir filmen sie und können sie mit den entsprechenden Phasen in Verbindung bringen“, erläutert García-Moreno. Diese Option ist bereits in dem Userbetrieb aufgenommen worden und erste Nutzergruppen mit interessanten Fragestellungen haben sich schon angemeldet. arö



Die Skizze oben zeigt den Strahlverlauf durch die Probe an der EDDI-Beamline. Die neue Hochgeschwindigkeitskamera befindet sich über der Probe. Unten: Seitenansicht der Beamline.



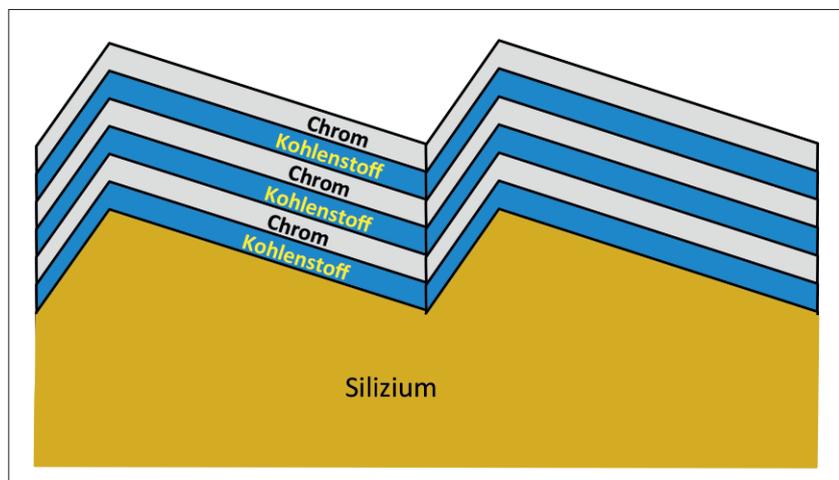
## MIT DEM SÄGEZAHN ZU TENDER X-RAY

**Neuartige optische Gitter**, die maßgeblich von einem Forscherteam am HZB entwickelt wurden, erschließen einen bislang schwer zugänglichen Teil des Röntgenspektrums für die Energieforschung.

Der Speicherring BESSY II liefert weiche Röntgenstrahlung in einem Spektralbereich von bis zu 15 Kiloelektronenvolt Photonenenergie – ein weites Feld, um viele unterschiedliche Forschungsfragen zu klären. Doch ein Teil des energetischen Spektrums musste bisher für Experimente weitgehend ausgespart bleiben. „Der Energiebereich zwischen zwei und fünf Kiloelektronenvolt ließ sich kaum wissenschaftlich nutzen, weil es keine optischen Elemente gab, die für die experimentellen Anforderungen effizient genug waren“, sagt Prof. Dr. Alexei Erko, Leiter des Instituts für Nanometeroptik und Technologie (FG-INT) am HZB. Die Wissenschaftler sprechen bei diesem „weißen Fleck“ im Spektrum der Synchrotron-Strahlungsquelle neuerdings von „Tender X-Ray“ (englisch für „zartes Röntgenlicht“).

### Erfolgreiche Kombination zweier Technologien

Einem Team von Forschern um Alexei Erko ist es gelungen, den Mangel an tauglichen optischen Komponenten – sie sind erforderlich, um die Strahlung zu fokussieren und bestimmte Frequenzen aus ihr herauszufiltern – für den Tender-X-Ray-Bereich zu beheben. Gemeinsam mit Kollegen an der niederländischen Universität Twente und der Tongji University in Shanghai entwickelten sie eine neuartige Struktur, die auch diesen Spektralbereich für wissenschaftliche Untersuchungen zugänglich macht. „Dazu vereinten wir zwei verschiedene technologische Ansätze in einem optischen Element miteinander“, erklärt Erko: die Herstellung von optischen Mehrschichten, sogenannten Multilayern, die wie ein Sandwich aus unterschiedlichen Materialien aufgebaut sind, und ein sogenanntes Sägezahngitter. Die Oberfläche dieses speziell geformten Bauteils erinnert an die Zähne einer Säge.



Die Kombination aus optischen Mehrschichten aus Chrom und Kohlenstoff auf einem Siliziumwafer und einem nur wenige Nanometer großen Sägezahngitter ermöglicht die Nutzung des zarten Röntgenlichts für die wissenschaftliche Forschung.

Die Forscher am HZB sind weltweit die einzigen, die die feinen Strukturen in hoher Qualität herstellen können. Dazu nutzen sie Fertigungsanlagen und Expertise, die das Berliner Forschungszentrum vom Optikunternehmen Carl Zeiss übernommen hat, wo man die Produktion von Sägezahngittern 2008 aufgegeben hatte. Die Wissenschaftler in Twente und Shanghai sind hingegen Experten für die hochpräzise Herstellung übereinanderliegender hauchdünner Schichten aus unterschiedlichen Werkstoffen.

### Aufwändige Berechnung der optimalen Größe

Die Kombination beider Technologien ermöglicht es erstmals, sehr effiziente Gitterelemente auch für den schwer zu handhabenden Energiebereich des zarten Röntgenlichts zu produzieren. Der Physiker Dr. Friedmar Senf, ehemaliger Gruppenleiter am HZB-Institut für Nanometeroptik und Technologie und derzeit Gastwissenschaftler am Institut für Methoden und Instrumentierung der Forschung mit Synchrotronstrahlung des HZB, berechnete in aufwändigen Simulationen, wie Sägezahngestalt und Mehrfachbeschich-

tung vereint werden müssen, um das bestmögliche Resultat zu erzielen. Er ermittelte theoretisch die optimalen Dimensionen und Materialparameter des Gitters und fand heraus, dass sich für die Mehrfachsichten eine Verbindung von Chrom und Kohlenstoff besonders gut eignet – zwei chemische Elemente, deren elektronische Absorptionskanten weit außerhalb des Energiebereichs von Tender X-Ray liegen. Seine Resultate sowie erste Messergebnisse stellte Senf öffentlich auf dem zweiten Deutsch-Schwedischen Workshop für Röntgenoptik vor, den das HZB Ende April 2015 in Berlin ausrichtete – und stieß damit auf großes Interesse bei den Teilnehmern der Veranstaltung. Daraufhin wurden weitere Gitter und Mehrfachsichten hergestellt und vermessen. Für die Herstellung der Sägezahn-Gitter beschichteten die Wissenschaftler am HZB hochgenau polierte Siliziumwafer mit 300 Nanometern Gold. In die Goldschicht ritzen sie dann mit einer Diamantspitze wenige Nanometer tiefe Sägezahnritzen. Die Anforderungen an die Prozessbedingungen waren enorm: „Um die sehr feinen Strukturen gleichförmig zu erzeugen, war vor allem eine extrem stabile Temperatur wichtig“, berichtet Alexei Erko: Die Temperaturschwankungen während der Herstellung durften nicht größer sein als ein Hunderstel Grad Celsius.

### Größere Gitter für die wissenschaftliche Forschung

Das Ritzen der etwa 60 Millimeter langen und 30 Millimeter breiten Gitterfläche dauerte in der Regel fünf bis zehn Tage, an denen die Temperatur stabil gehalten werden musste. Anschließend wurde abwechselnd Schicht für Schicht Kohlenstoff und Chrom aufgedampft, mit einer Genauigkeit von einem Zehntel Nanometer Dicke. Das Ergebnis dieser aufwändigen Fertigungsprozedur sind optische Elemente mit bislang einzigartigen Eigenschaften. Tests auf einem Entwicklungsprüfstand an BESSY II belegen, dass bei der Beugung des zarten Röntgenlichts einer Sägezahn-Sandwichstruktur vergleichsweise wenig Energie verloren geht: Die Effizienz beträgt circa 55 Prozent bei einer Photonenenergie von vier Kiloelektronenvolt. „Keine andere optische Komponente ist bei dieser Photonenenergie auch nur annähernd so effizient“, betont Erko. „Vergleichbare herkömmliche Gitter haben lediglich eine Effizienz von zwei bis drei Prozent.“ Die Forscher stießen auch auf eine weitere herausragende Eigenschaft der neuartigen Gitterstruktur: Höhere Beugungsordnungen, wie sie bei herkömmlichen Gittern auftreten und die Experimente beeinträchtigen, entstehen bei der Reflexion des Röntgenlichts an dem Mehrfachsicht-Sägezahn-Gitter kaum. „Das macht diese Gitterstruktur auch für Experimente bei niedrigeren Energien unter einem Kiloelektronenvolt interessant, wo höhere Beugungsordnungen besonders stark stören“, erklärt Erko, der von einem Durchbruch spricht: „Mit dieser Entwicklung lässt sich nun sicher sagen, dass der Speicherring BESSY II in einem sehr breiten Spektralbereich mit bester Qualität nutzbar ist.“

„Als nächsten Schritt werden wir größere Gitter herstellen“, sagt Friedmar Senf – groß genug für den Einsatz im wissenschaftlichen Alltag an realen Synchrotron-Strahlungsquellen. „Wir haben als nächstes vor, ein gerade im Aufbau befindliches Strahlrohr für Röntgenmikroskopie, das bis zu einer Photonenenergie von drei Kiloelektronenvolt betrieben werden soll, mit einem großen Sandwich-Sägezahn-Gitter auszustatten“, berichtet der Physiker. Seine Berechnungen belegen, dass sich auch so große Sandwich-Sägezahn-Gitter problemlos herstellen lassen. Zudem werden die hocheffizienten Elemente künftig am Energy Materials *In situ* Laboratory (EMIL) bei BESSY II integriert.

### Neues Energiefenster für Experimente

„Der Bedarf an den neuartigen Gittern ist groß, weil sie ein besonders vielversprechendes Energiefenster für experimentelle Untersuchungen mit Röntgenlicht zugänglich machen“, sagt Alexei Erko. Denn in diesem Spektralbereich befinden sich die elektronischen Absorptionskanten vieler für die Energieforschung wichtiger chemischer Elemente, wie Schwefel, Phosphor, Aluminium und Silizium. Sie spielen eine zentrale Rolle zum Beispiel bei der Entwicklung neuartiger Energiematerialien. Die Forschung, für die das Team am HZB und seine Partner nun die Tür aufgestoßen haben, lässt daher auf spannende neue Erkenntnisse und wesentliche Fortschritte bei der Umwandlung und der Speicherung von Energie hoffen.

rb

2nd German-Swedish Workshop on X-ray Optics, Berlin, 28th-30th April 2015: Performance of a blazed multilayer grating for energies between 800 eV and 5.000 eV, calculations and measurements; F. Senf et al.

### ZUSAMMENGEFASST

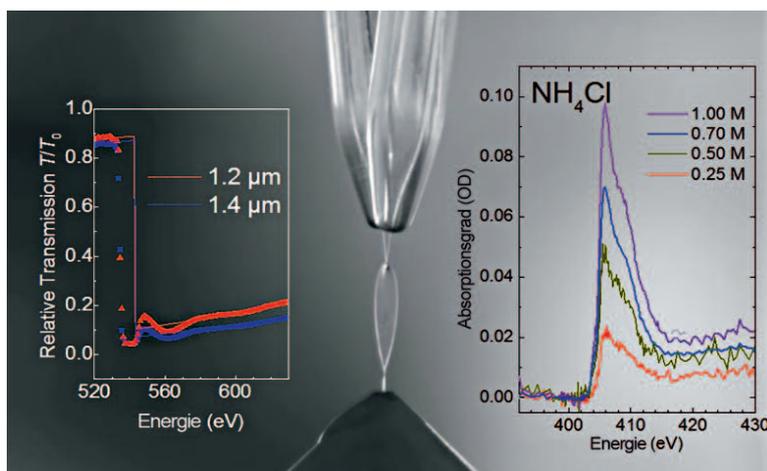
- Der Energiebereich von weicher Röntgenstrahlung zwischen zwei und fünf Kiloelektronenvolt ließ sich bislang aufgrund fehlender optischer Elemente kaum wissenschaftlich nutzen.
- Einem internationalen Forscherteam um Prof. Dr. Alexei Erko vom HZB ist es durch die Kombination zweier bekannter Technologien gelungen, die erforderlichen optischen Elemente zu entwickeln.
- Dazu ritzen sie ein hauchdünnes Sägezahn-Gitter in ein aus Chrom und Kohlenstoff bestehendes Material aus optischen Mehrfachsichten. Die optimale Größe des Gitters hatte Dr. Friedmar Senf zuvor berechnet.
- Im nächsten Schritt werden die Gitter für die wissenschaftliche Forschung zur Verfügung gestellt. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten für die Entwicklung von Energiematerialien.

## ULTRADÜNNE WASSERFILME ZUM FLIESSEN GEBRACHT

Teams des Max-Born-Instituts für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, des HZB und des MPI für Dynamik und Selbstorganisation haben ein **Flachstrahlssystem für Transmissionsmessungen** flüssiger Proben im weichen Röntgenbereich entwickelt.

Element-spezifische Röntgenmethoden nehmen eine Schlüsselrolle bei der Untersuchung der atomaren Struktur und Zusammensetzung funktionaler Materialien ein. Mithilfe der Röntgenspektroskopie können Oxidationszustände, Abstände, Koordinationszahlen und die Art der nächsten Nachbarn des ausgewählten Elementes bestimmt werden. Mit einer großen Vielfalt spektroskopischer Methoden mit Röntgenstrahlung wurden bisher zahlreiche

der Transmission aufgrund der großen Absorptionsquerschnitte im weichen Röntgenbereich schwierig zu realisierende Probendicken im Bereich von einem Mikrometer und darunter (ein Mikrometer = ein Millionstel Meter). Im Gegensatz dazu sind Messungen des Absorptionsspektrums basierend auf dem Nachweis sekundärer Zerfallssignale, wie zum Beispiel der Röntgenfluoreszenz, auf vergleichsweise hochkonzentrierte Proben beschränkt.



Flachstrahlssystem für Flüssigkeiten mit den beiden Düsen, den beiden kollidierenden laminaren Flüssigkeitsstrahlen und dem einen Millimeter breiten und fünf Millimeter langen blattförmigen Wasserfilm mit einer Dicke von ein bis zwei Mikrometern. Die Dicke des Films wurde aus Transmissionsmessungen an der Sauerstoff-Absorptionskante bestimmt (links). Das Flachstrahlssystem ermöglicht Absorptionsmessungen im weichen Röntgenbereich in Transmission, wie beispielhaft mit der Messung des Absorptionsspektrums an der Stickstoff-Absorptionskante von Ammoniumchlorid gezeigt werden konnte (rechts).

gasförmige, flüssige und feste Proben oder molekulare Systeme an Grenzflächen untersucht. Dabei konnten stationäre und zeitabhängige Materialeigenschaften vorwiegend an Synchrotronstrahlungsquellen und neuerdings an Röntgen-Freie-Elektronen-Lasern bestimmt werden.

Die Untersuchung flüssiger Proben mit Absorptionsspektroskopie im weichen Röntgenbereich (im Energiebereich von etwa 0,2 bis 1,5 keV) stellt eine besondere Herausforderung dar. Zum einen müssen die Experimente unter Ultrahochvakuum-Bedingungen durchgeführt werden, in einer Umgebung also, die scheinbar unvereinbar mit dem hohen Dampfdruck von Wasser ist. Zum anderen erfordert die Messung

### Phänomen aus der Fluidodynamik genutzt

Eine Lösung für diese Probleme stellt die Verwendung von Zellen mit dünnen Membranbasierten Fenstern für Transmissionsmessungen dar. Damit kann die Dicke des Flüssigkeitsfilms zwar kontrolliert werden, allerdings können damit keine strahlungsempfindlichen molekularen Proben untersucht werden: Die Probe wird im Röntgenstrahl oder in einem sichtbaren Laserstrahl in Laser-Anregungs- und Röntgen-Abfrage-Messungen zerstört. Dieser Strahlenschaden lässt sich vermeiden, indem die Probe in einem Flüssigkeitsstrahl kontinuierlich ersetzt wird. Mit solchen Flüssigkeitsstrahlen, bei denen die Flüssigkeit durch eine Düse in die Hochvakuumkammer gepresst wird, ist es schwierig oder gar unmöglich, Probendicken im Bereich von einem Mikrometer oder darunter zu realisieren.

In einer Zusammenarbeit haben nun Wissenschaftler des HZB gemeinsam mit Kollegen des Max-Born-Instituts für Nichtlineare Optik

und Kurzzeitspektroskopie (MBI) und des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation (MPIDS) ein neuartiges Flachstrahlssystem für Transmissionsmessungen flüssiger Proben im weichen Röntgenbereich erfolgreich angewendet. Dabei wurde ein wohlbekanntes Phänomen aus der Fluidodynamik genutzt: Wenn sich zwei identische laminare Flüssigkeitsstrahlen unter einem wohldefinierten Winkel treffen, breitet sich die Flüssigkeit radial aus, was zur Ausbildung eines dünnen blattförmigen Flüssigkeitsfilms senkrecht zur Ebene der beiden Strahlen führt. Dieser Film wird durch eine ebenfalls aus der Flüssigkeit gebildete Randlippe stabilisiert.

Die Innovation besteht darin, dass ein über Stunden stabiler Flachstrahl im Vakuum (bei Drücken kleiner als  $10^{-3}$  mbar) mit einer Dicke im Bereich von einem bis zwei Mikrometern realisiert und angewendet wurde. Erstmals konnten damit Absorptionsspektren flüssiger Proben in Transmission mit Photonenenergien im Weichröntgenbereich und völlig ohne Membran-basierte Fenster gemessen werden. Die röntgen-

spektroskopischen Messungen wurden an BESSYII durchgeführt. Dieser technologische Durchbruch eröffnet völlig neue Möglichkeiten für die stationäre und zeitaufgelöste Spektroskopie flüssiger Proben mit weicher Röntgenstrahlung. arö

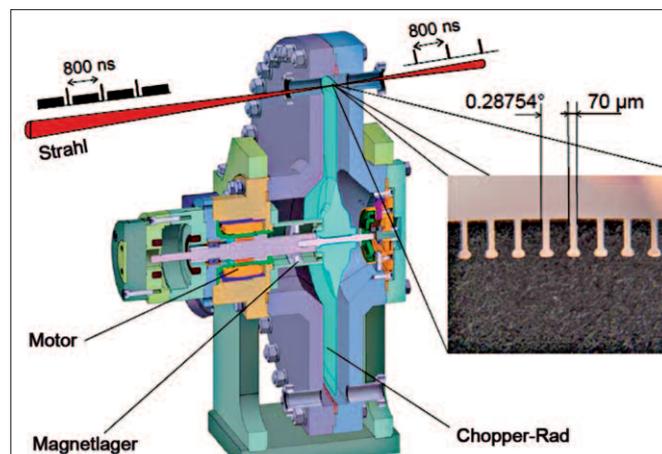
Struct. Dyn. 2, 054301 (2015); (DOI: 10.1063/1.4928715): A liquid flat-jet system for solution phase soft-x-ray spectroscopy; M. Ekimova et. al

## GEZIELTE PULSAUSWAHL AN BESSY II

Teams aus dem Forschungszentrum Jülich, dem MPI für Mikrostrukturphysik Halle und dem HZB haben einen extrem rasch **rotierenden Megahertz-Lichtchopper** entwickelt. Er ist ein Kernstück des neuen gemeinsamen Labors Uppsala-Berlin zur Extraktion des Hybrid-Pulses aus der 200-Nanosekunden-Lücke im Füllmuster.

In Speicherringen wie BESSY II kreisen kurze Elektronenpulse und erzeugen Röntgenblitze, wenn sie an einem der fast 50 Strahlrohre vorbeikommen. Viele Experimente nutzen aber gar nicht alle der 400 möglichen Pulse pro Umlauf, die der Elektronenstrahl erzeugt, sondern erfordern nur einen einzigen Puls. Damit nur dieser gewünschte Puls die Probe erreicht und alle anderen ausgeblendet werden, könnte man ein Rad mit Löchern in den Strahlengang setzen, das mit den Elektronen im Ring synchron läuft. Doch diese einleuchtende Idee war keineswegs einfach umzusetzen: Denn dieses Rad muss so schnell sein, dass es den Röntgenstrahl alle 800 Nanosekunden (ns) passieren lässt – es muss sich also mit der dreifachen Schallgeschwindigkeit von etwa einem Kilometer pro Sekunde drehen und ist dabei enormen Materialbelastungen durch Fliehkräfte ausgesetzt.

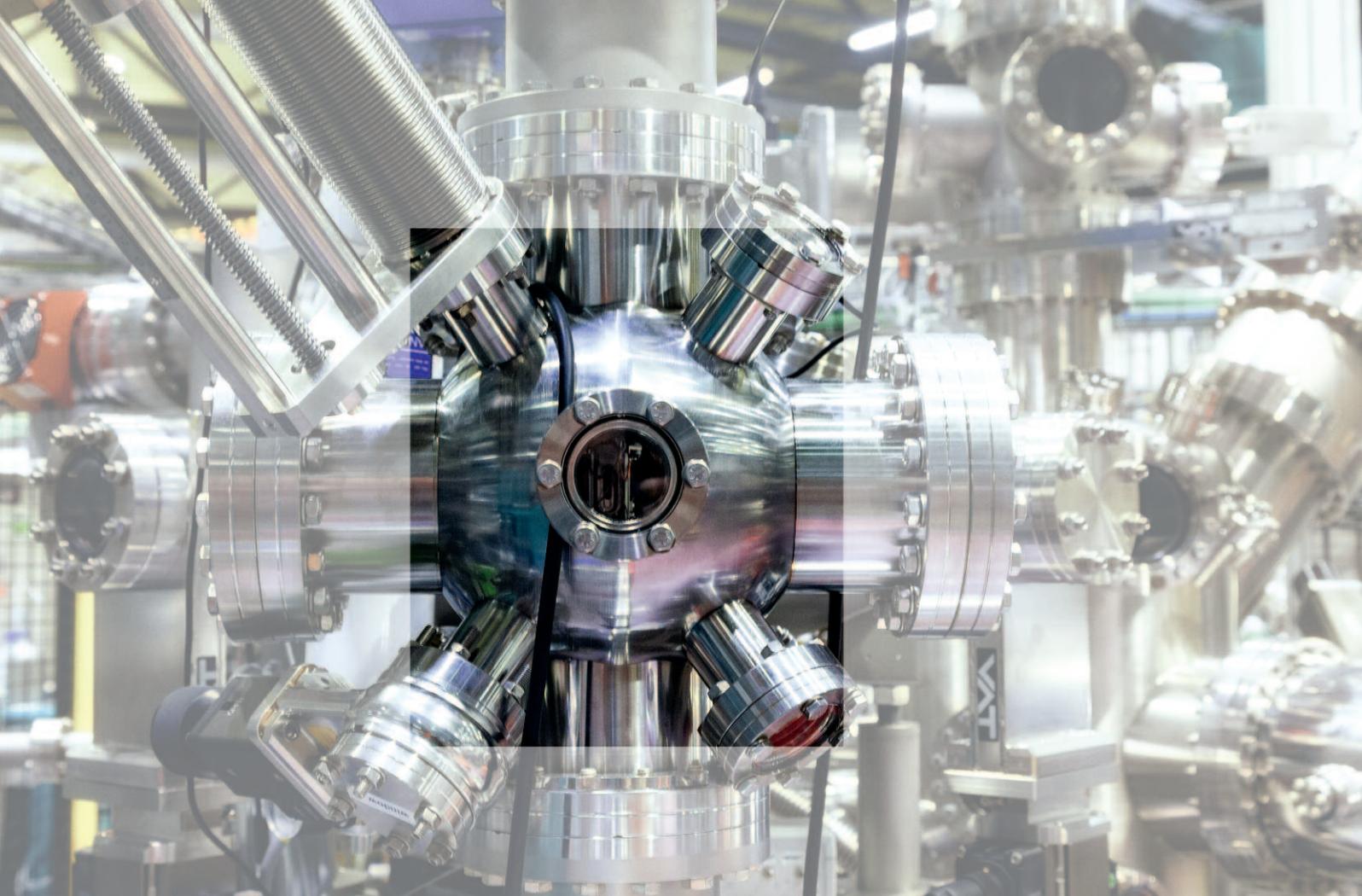
Tatsächlich ist es nun einem Team aus Physikern und Ingenieuren aus dem Forschungszentrum Jülich, dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle/Saale und dem HZB gelungen, so ein Gerät zu entwickeln und im Dauerbetrieb an einem BESSY II Strahlrohr bereitzustellen. Es besteht aus einer speziell geformten Scheibe aus einer besonderen Aluminiumlegierung, die am äußeren Rand winzige Schlitze von nur 70 Mikrometern Breite hat. Diese Schlitze bewegen sich mit dreifacher Schallgeschwindigkeit im Vakuum reibungsfrei gegen den Röntgenstrahl. Dabei wird die Drehung mit einer ultraschnellen digitalen Regelungselektronik hochpräzise (auf zwei Nanosekunden genau) gesteuert, sodass nur ein einziger Röntgenpuls aus dem gesamten Puls-Zug bei BESSY II durchkommt und andere blockiert werden.



Skizze des MHz-Lichtchoppers, der sich mit bis zu dreifacher Schallgeschwindigkeit dreht.

Experimentatoren können an diesem Strahlrohr nun selbst entscheiden, ob sie den gepulsten „Single Bunch Modus“ oder den vollen quasi-kontinuierlichen Röntgenstrahl benutzen wollen. „Dies ist besonders wichtig für die ultraschnelle Röntgenphysik und Flugzeitspektroskopie-Methoden, die im Zukunftsprojekt BESSY-VSR des HZB eine große Rolle spielen werden – denn hier sollen ultrakurze Röntgenpulse unterschiedlicher Länge bereitgestellt werden“, erklärt Dr. Karsten Holldack aus dem Institut Methoden und Instrumentierung der Forschung mit Synchrotronstrahlung am HZB. KH/arö

Optics Letters, Vol. 40, 10, (2015); (DOI: 10.1364/OL.40.002265): Phase-locked MHz pulse selector for x-ray sources; D. F. Förster et. al



## BESCHLEUNIGERFORSCHUNG UND -WEITERENTWICKLUNG

**Zentrales strategisches Ziel** des HZB ist es, die Photonenquelle BESSY II mittelfristig zu einem „Speicherring mit variablen Puls­längen (BESSY VSR)“ weiterzuentwickeln.

**BESSY II** stellt seit Juli 2015 ein neues Standardfüllmuster bereit. Es eröffnet der Nutzerschaft neue Möglichkeiten für zeitaufgelöste Experimente im Multibunch Betrieb.

**Mit dem Einbau** zweier neuer Kavitäten und zwei weiterer Sender im Speicherring und am Synchrotron wurde der Ersatz der Kavitäten und die Umstellung auf Festkörpersender abgeschlossen. In 2015 sind die Low Dose Photoemission Station, die  $\mu$ mRIXS, die CXS Stationen sowie die XPP-KMC-3 Beamline in den Nutzerbetrieb gegangen.

**BESSY-VSR** wird es Forscherinnen und Forschern ermöglichen, statische und dynamische Experimente nahezu gleichzeitig durchzuführen. In 2015 wurden dazu weitere wesentliche technische Fragen gelöst, wie etwa das „Pulse-Picking“, und die Möglichkeit, Elektronenpakete auf unterschiedlichen Trajektorien zu zirkulieren.

**Mit dem Projekt bERLinPro** hat das HZB im Jahr 2015 eine wichtige Aufgabe zur Technologieexplorierung für Photonenquellen der nächsten Generation übernommen. Ziel des Projekts ist die Demonstration der Machbarkeit eines Energy Recovery Linacs für hohe mittlere Elektronenströme und kleine Emittanzen. 2015 wurde mit dem Bau des Gebäudes begonnen.

## DIE BESCHLEUNIGERPHYSIK BLICKT NACH BERLIN

Im Herbst 2015 hat der Bau der neuen Beschleunigerhalle von bERLinPro am Standort Adlershof begonnen, in der eine kompakte Testanlage für einen **Linearbeschleuniger mit Energierückgewinnung (ERL)** aufgebaut wird. Damit hat das HZB einen weiteren Schritt auf dem Weg zur Realisierung eines technologisch einzigartigen Projekts gemacht.

Die internationale Zusammenarbeit ist eine Voraussetzung für die Entwicklung einer neuen, faszinierenden Beschleunigertechnologie - das erklärte die wissenschaftliche Geschäftsführerin des HZB, Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla, anlässlich des Spatenstichs für die neue Beschleunigerhalle. Sie dankte den Geldgebern für deren Engagement und Unterstützung. Prof. Dr. Andreas Jankowiak, Leiter des HZB-Instituts Beschleunigerphysik



Spatenstich für die Beschleunigerhalle von bERLinPro (v.l.n.r.): Prof. Dr. Jens Knobloch, Thomas Frederking, Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla, Prof. Dr. Andreas Jankowiak und Constanze Tibes. Im Sommer 2016 konnte Richtfest gefeiert werden.

und Projektleiter von bERLinPro, erläuterte, dass das HZB mit dem Projekt tatsächlich Neuland betrete und daher viele Beschleunigerphysiker in der nächsten Zeit gespannt nach Berlin blicken würden. Sein Institut will gemeinsam mit dem Team von Prof. Dr. Jens Knobloch, Leiter des HZB-Instituts SRF-Wissenschaft und Technologie, einen Linearbeschleuniger mit Energierückgewinnung bauen. Es soll eine Testanlage entstehen, die alle Schlüsselkomponenten umfasst und die die grundsätzliche Anwendbarkeit dieser Technologie für zukünftige Großgeräte demonstriert. Die HZB-Forscher wollen mithilfe der Testanlage den Parameterraum studieren, um später solche Beschleunigeranlagen bei höchsten Intensitäten optimal für die Forschung betreiben zu können.

Von 2017 an werden die Komponenten für den ERL in der Beschleunigerhalle schrittweise aufgebaut, und ab 2018 beginnen die ersten Strahltests mit dem Ziel, 2020 die Anlage vollständig in Betrieb zu nehmen. Andreas Jankowiak betont: „Die eigentliche Herausforderung besteht darin, die verschiedenen Komponenten und neue Methoden zu entwickeln. Deshalb gilt hier in besonderem Maße: Der Weg ist das Ziel.“ Auch der Bau der Beschleunigerhalle ist ein schwieriges Projekt. Die Planer müssen dabei die Anforderungen des Strahlenschutzes berücksichtigen und die technische Versorgung zur Kühlung des supraleitenden Test-Beschleunigers sicherstellen. Constanze Tibes vom betreuenden Architekturbüro DGI Bauwerk betont, dass die Planungen extrem komplex und ohne Vorbild seien. Sie nennt die Beschleunigerhalle ein „Unikat für die Wissenschaft“, das unter Federführung der HZB-Bauabteilung errichtet wird.

### Neue Komponenten und Methoden entwickeln

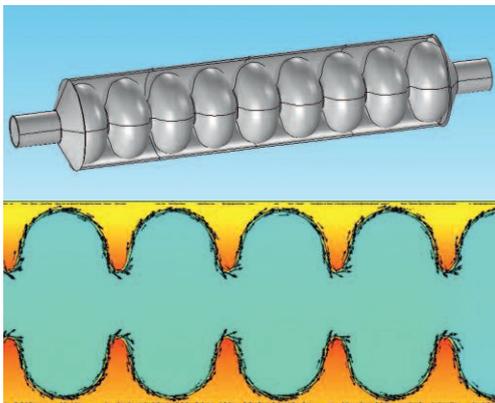
Mit bERLinPro entsteht eine Testanlage für höchste Ströme und kleinste Emittanzen. Die Idee des Energy Recovery Linac wurde bereits in den 1960er-Jahren formuliert. Es dauerte mehr als 30 Jahre, bis ab Anfang 2000 die ersten Anlagen, etwa am Jefferson Lab, dem Japan Atomic Energy Research Institute, dem ALICE am Daresbury Laboratory in Cheshire, England, und dem NovoFEL am Budker Institut für Nuklearphysik in Novosibirsk in Betrieb genommen wurden. „Wir verstehen die Physik dieser Anlagen nun viel besser und haben die Voraussetzungen, die damit verbundenen Schwierigkeiten zu lösen“, so Jankowiak. Unter anderem müssen völlig neue Komponenten entwickelt werden, wie etwa eine hochbrillante Hochfrequenz-Photoelektronenquelle und supraleitende Kavitäten für den kontinuierlichen (Dauerstrich) Betrieb bei höchsten Strömen. Diese Entwicklungsarbeiten finden in nationalen und internationalen Kooperationen, unter anderem mit dem DESY, dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, dem Max-Born-Institut, dem Jefferson Laboratory, dem Brookhaven National Lab, der Cornell University und dem Budker Institut statt. Auch deutsche Universitäten, unter anderen in Dortmund, Rostock, Mainz und Berlin, sind an diesen Arbeiten beteiligt. sz

## TEURE MAGNETISCHE STÖRFRIEDE

**Supraleitende Materialien** verhindern teure Wärmeverluste in Teilchenbeschleunigern. Doch ein kleiner Schwund an Energie bleibt. Forscher am HZB konnten nun klären, woran das liegt.

In Teilchenbeschleunigern werden elektrisch geladene Partikel auf hohe Geschwindigkeit gebracht, um für die Forschung wertvolle Strahlung zu erzeugen. Das geschieht mithilfe von „Kavitäten“ – geschlossenen Kammern, in denen elektromagnetische Schwingungen angeregt werden und sich durch Resonanz verstärken lassen. Bei herkömmlichen Anlagen bestehen sie aus Kupfer, das eine besonders hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt. Der Nachteil: Das Metall erhitzt sich beim Betrieb des Beschleunigers stark und muss aufwändig gekühlt werden.

Oben: Schematische Darstellung einer Kavität, in der elektromagnetische Schwingungen angeregt und verstärkt werden. Die darin auftretenden Thermostrome (unten) lösen schwache Magnetfelder aus, die Energieverluste verursachen.



Resonatoren für modernere Anlagen werden daher aus supraleitendem Material gefertigt – meist aus Niob, das unterhalb von etwa neun Kelvin (minus 264 °C) seinen elektrischen Widerstand für Gleichstrom vollständig verliert. Fließt Wechselstrom durch das Material, bleibt auch unterhalb der sogenannten Sprungtemperatur ein schwacher Restwiderstand erhalten. Er ist beispielsweise bei einer Frequenz von 1,5 Gigahertz nur ein Zehnmillionstel so groß wie der Widerstand in Kupfer und schwindet weiter, wenn die Temperatur gegen den absoluten Nullpunkt sinkt. „Daneben lässt sich ein weiterer Restwiderstand feststellen, dessen Ursache bislang nicht vollständig verstanden ist“, sagt Prof. Dr. Jens Knobloch, Leiter des HZB-Instituts SRF – Wissenschaft und Technologie. Durch den deutlich verringerten Widerstand verschwinden auch die thermischen Verluste – zumindest in der Theorie. Tatsächlich aber verzehrt auch in einer supralei-

tenden Kavität der Restwiderstand ständig Energie. Das hat kostspielige Folgen: „In einer großen Beschleunigeranlage mit vielen supraleitenden Hochfrequenz-Kavitäten betragen die Kosten allein für die Flüssigheliumanlage zur Kavitätenkühlung mehrere Dutzend Millionen Euro. Pro Jahr fallen für den Betrieb zusätzlich mehrere Millionen Euro an“, erläutert Knobloch. Ein wichtiges Ziel der Anlagenbetreiber ist es daher, die Verluste durch eine möglichst hohe Güte (High-Q) der Resonatoren weiter zu verringern. Jens Knobloch und seinem Team am HZB ist ein entscheidender Schritt dorthin gelungen: Die Forscher konnten eine Ursache des Restwiderstands in supraleitenden Kavitäten klären. „Da die Kavität aus Niob in einen Tank aus Titan eingeschweißt ist, bilden sich dort, wo beide Metalle aneinandergrenzen, beim Abkühlen Thermolemente aus“, erklärt Julia-Marie Köszegi, die diesen Effekt zusammen mit ihrem Teamkollegen Dr. Oliver Kugeler untersucht hat: „Die unterschiedlichen Temperaturen der beiden Kavitätenenden beim Abkühlen führen dazu, dass ein Thermostrom in der Kavität fließt“, sagt Kugeler. „Dadurch entstehen schwache Magnetfelder, die in dem supraleitenden Material ‘eingefroren’ werden“ – das ist die Ursache der Energieverluste.“

### Widerspruch zu physikalischen Gesetzen aufgelöst

Das Ziel der Forscher war es, diese Modellvorstellung experimentell und mit Computersimulationen nachzuweisen. Dazu kühlten und erwärmten sie eine Niob-Resonanzkammer mehrmals im Wechsel und maßen präzise deren Verluste. „Dabei konnten wir die Korrelation zwischen Temperaturdifferenz und Verlusten eindeutig nachweisen“, sagt Köszegi. Auch einen scheinbaren Widerspruch zu physikalischen Gesetzen konnten die Wissenschaftler auflösen: In einer zylinderförmigen Kavität darf aufgrund der Symmetrie gar kein magnetisches Feld auf der Innenwand der Kavität entstehen. „Doch weil die Abkühlung nicht gleichmäßig verläuft, sondern von unten nach oben voranschreitet, wird die Symmetrie zerstört“, erklärt Knobloch. Die Forscher ermittelten auch die thermoelektrischen Eigenschaften von Niob und Titan. Diese Daten sowie Messungen des Temperaturgradienten entlang der Kavität flossen in

Computersimulationen des Abkühlvorgangs ein. Ihre Ergebnisse bestätigten die direkt gemessenen Magnetfelder in der Kavität. „Damit haben wir belegt, dass unsere Theorie plausibel ist“, resümiert Knobloch. „Das macht deutlich, welche große Rolle magnetische Effekte in einer supraleitenden Kavität spielen.“ Deren Einfluss habe man bisher unterschätzt. Für den Bau von Teilchenbeschleunigern haben die Resultate enorme Bedeutung: „Sie bieten die Chance, viel Geld zu

sparen“, sagt Knobloch. „Denn wenn man weiß, was in dem Material vor sich geht, kann man gezielt Energieverluste verringern.“ Deshalb haben die Ergebnisse viel Aufsehen erregt und andere Gruppen zu weiterer Forschung animiert. *rb*

Phys. Rev. STAB 18 (DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.18.042001): High-Q operation of superconducting rf cavities: Potential impact of thermocurrents on the rf surface resistance; J.-M. Vogt, O. Kugeler and J. Knobloch

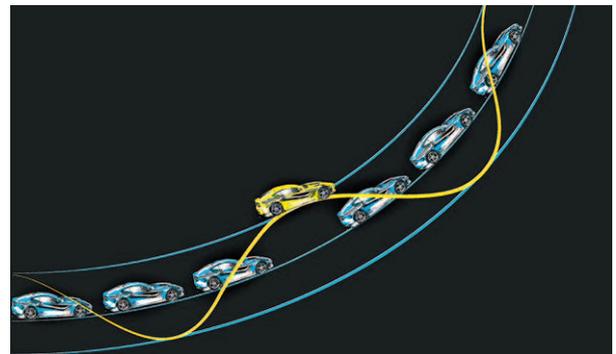
## BESSY II MIT ZWEITER SPUR

Das Beschleuniger-Team am HZB kann im Elektronenspeicherring eine zweite Spur erzeugen, auf der zusätzliche Elektronenpakete zirkulieren und Lichtblitze an die Experimentierstationen abgeben. Damit hat das HZB weltweit Neuland betreten und zugleich einen wichtigen Schritt auf dem Weg zum **Variablen Speicherring** gemacht.

**S**tark vereinfacht könnte man die Elektronenbahnen in BESSY II mit einer Autobahn vergleichen, die bislang nur eine Spur hatte: Die Elektronenpakete im Speicherring entsprächen in diesem Bild Autokolonnen, die auf dieser Spur im Kreis fahren und an bestimmten Stellen ihre „Scheinwerfer“ aufblenden, um die Experimente an den Beamlines mit Lichtblitzen zu versorgen. Nun hat ein Team aus dem HZB-Institut für Beschleunigerphysik eine „zweite Spur“ erzeugt, auf der einzelne Elektronenpakete zirkulieren. Durch besondere Einstellungen der Magnetoptik bildet sich neben der ersten stabilen Umlaufbahn im Speicherring eine zweite Spur aus, die sich um die erste Umlaufbahn herumwindet. „Wir können die Elektronenpakete dabei sehr gut kontrollieren und auf beiden Spuren quasi beliebige Füllmuster realisieren“, sagt Prof. Dr. Andreas Jankowiak, der das HZB-Institut für Beschleunigerphysik leitet. Als Füllmuster bezeichnen die Physiker die Anordnungen und Abstände zwischen den Elektronenpaketen; um im Bild der Autobahn zu bleiben: Ein Füllmuster könnte zum Beispiel aus Wagenkolonnen oder aus einzelnen Autos in bestimmten Abständen bestehen.

### Lichtpulse mit Pausen – ganz nach Bedarf

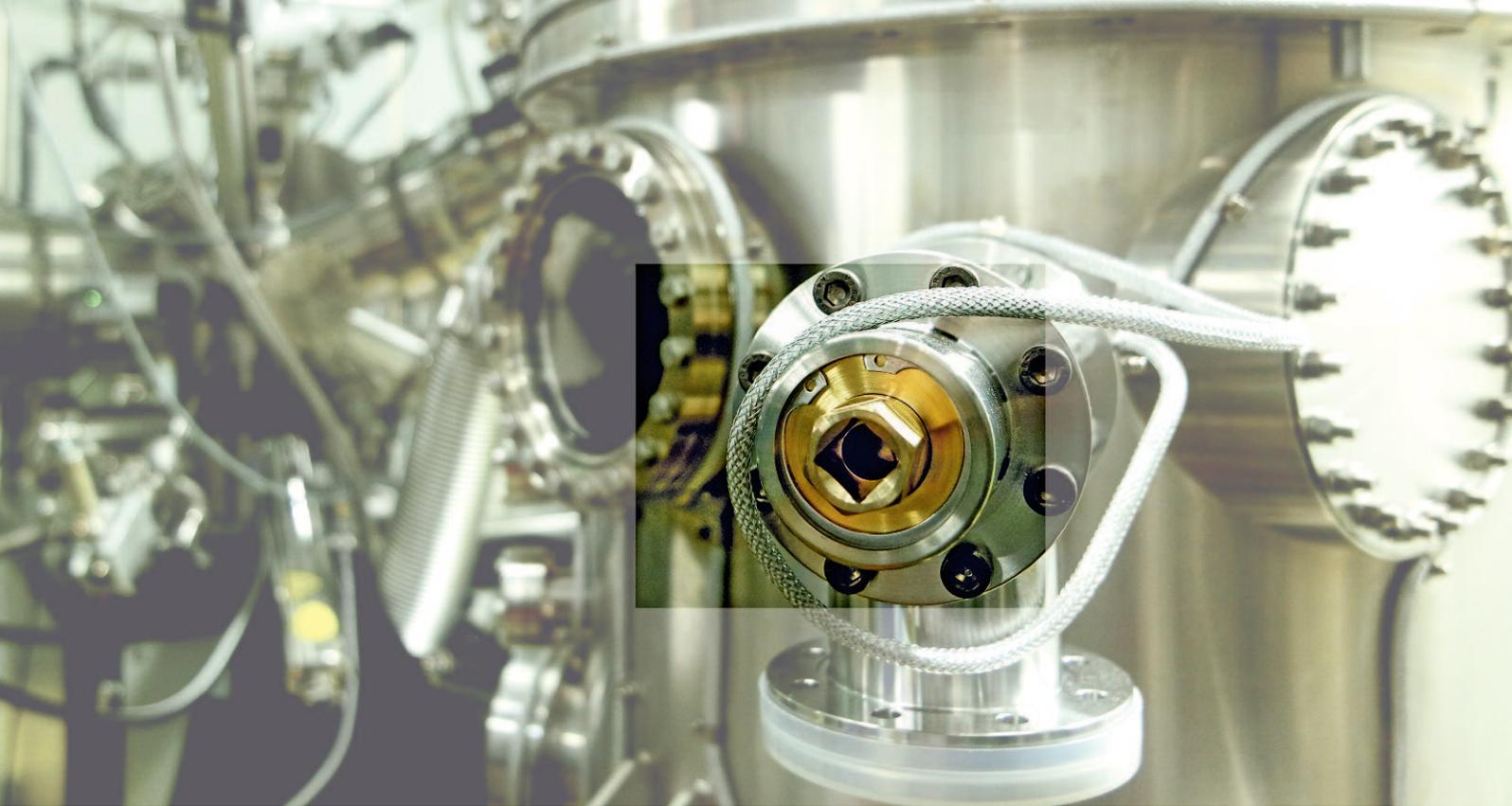
Der neu entwickelte Modus konnte bereits stabil eingestellt werden, und erste Tests an Experimentierstationen zeigen vielversprechende Resultate. In der Zukunft wird diese Entwicklung das Angebot von BESSY II für die Nutzergemeinschaft deutlich erweitern, denn es gibt bereits heute schon etablierte Verfahren, um gezielt einzelne Lichtblitze auszuwählen. So könnte man mit der neuen Methode die Haupt-



Das Bild veranschaulicht am Beispiel einer Autobahn, wie sich die zweite Spur um die erste Spur herumwindet. Die Experimentatoren an den Beamlines könnten dann zukünftig entweder die dichte Folge von Lichtblitzen der ersten Spur nutzen oder aber die einzelnen Lichtblitze der zweiten Spur auswählen.

spur mit Gruppen von Elektronenpaketen besetzen, die Lichtblitze in rascher Folge produzieren, während man auf der Zweitspur einzelne Elektronenpakete platzieren könnte; diese würden dann Lichtblitze mit Pausen erzeugen, was für manche Experimente ideal ist. Andreas Jankowiak ergänzt: „Diese Entwicklung nützt uns unmittelbar auch für unser Upgrade-Projekt BESSY-VSR, den Variablen Speicherring. Damit wollen wir künftig sowohl ultrakurze als auch längere Lichtblitze erzeugen, die man dann auf unterschiedliche Spuren setzen könnte.“ *arö*

Proceedings of IPAC 2015, ISBN 978-3-95450-168-7, Transverse resonance island buckets at the MLS and BESSY II; M. Ries et. al



## HIGHLIGHTS AUS DEN NUTZEREXPERIMENTEN

**Fast als 2.500 Nutzerbesuche** wurden 2015 am Elektronenspeicherring BESSY II in Berlin-Adlershof registriert. Sie verteilten sich auf 364 Forschergruppen aus 27 Ländern. Dabei wurden 567 externe Messkampagnen mit Strahlzeit bedient.

**251,67 Tage** wurde die Speicherringanlage BESSY II im Jahr 2015 für die wissenschaftliche Nutzung betrieben. Daraus ergibt sich eine Nutzungszeit von 6.040 Stunden beziehungsweise 755 Schichten à 8 Stunden. Das entspricht einer Verfügbarkeit von 69 Prozent. 880 Stunden beziehungsweise 110 Schichten waren für Beschleunigerstudien reserviert.

**15.480 Schichten** à 8 Stunden standen somit an den 24 Strahlrohren mit 35 Experimentierstationen zur Nutzung zur Verfügung. 2.913 Schichten wurden für die Weiterentwicklung der Experimentierstationen und zur Vorbereitung der Experimente benötigt. 912 Schichten standen der

Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zur alleinigen Nutzung zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von einzelnen Strahlrohren und Experimentierstationen konnten so 8.937 Schichten von internen und externen Messgästen genutzt werden.

**77 Prozent** oder 6.881,5 Schichten der insgesamt für die wissenschaftliche Nutzung zur Verfügung stehenden Kapazität, die tatsächlich von Nutzern in Anspruch genommen wurde, entfiel auf externe wissenschaftliche Projekte. HZB-Wissenschaftler nutzten 23 Prozent oder 2.055,5 Schichten im Rahmen ihrer Eigenforschung.

**161,5 Betriebstage** in zehn Reaktorzyklen an 13 Instrumenten stand die Neutronenquelle BER II nach den umfassenden Ertüchtigungsarbeiten im Jahr zuvor in 2015 zur Nutzung zur Verfügung. Das entspricht 2.099,5 Instrumenttagen. Weitere 4,5 Betriebstage waren für die Wiederinbetriebnahme des Reaktors reserviert.

## EXPERIMENTE MIT BIS ZU 26 TESLA

Nach zirka acht Jahren Bau- und Entwicklungszeit steht am HZB der **weltweit stärkste Magnet** für Untersuchungen mit Neutronen zur Verfügung. Er erzeugt ein kontinuierliches, bis zu 26 Tesla starkes Magnetfeld. Das eröffnet den Nutzern neue Möglichkeiten für die Forschung an einer Vielzahl unterschiedlichster Fragestellungen.

**M**it dem Hochfeldmagneten ist es möglich, Proben innerhalb extrem starker Magnetfelder von bis zu 26 Tesla mit Neutronen zu beschießen und so aktuelle Fragen aus Physik, Chemie, Biochemie und den Materialwissenschaften zu beantworten. 26 Tesla sind eine Million Mal stärker als das Magnetfeld der Erde. Bislang waren nur 17 Tesla möglich. Mit dem im Sommer 2015 eingeweihten Hochfeldmagneten steht damit ein bis zu 73 Prozent stärkeres Magnetfeld am HZB zur Verfügung als bisher. In der Grundlagenforschung sind Experimente mit Neutronen in Kombination mit starken Magnetfeldern von großem Nutzen. Magnetismus ist eine fundamentale Eigenschaft aller Stoffe. Daher gilt ein Magnetfeld neben Temperatur und Druck oft sogar als Schlüsselparаметer für Experimente, allerdings nur, wenn sie sehr stark sind. „Hohe Magnetfelder sind bereits überall im Einsatz. Forscher haben damit neue Phänomene beobachtet, aber sie konnten sie nicht im Detail erklären. Jetzt können wir am HZB den Hochfeldmagneten zusammen mit Neutronen nutzen. Das ist ein entscheidender Vorteil, um diese Phänomene zu verstehen“, sagt die wissenschaftliche Projektleiterin Prof. Dr. Bella Lake. Mit Experimenten am Hochfeldmagneten wollen die Forscher Supraleiter besser verstehen und ihre Eigenschaften so verbessern, dass sie auch bei nicht so tiefen Temperaturen funktionieren.

### Internationale Kooperation als Grundlage

Beim Bau des HFM waren Spezialisten aus den USA, Italien, den Niederlanden, der Schweiz und Deutschland beteiligt. Unter anderem entwickelte das National High Magnetic Field Laboratory aus Tallahassee, USA, die supraleitende Spule. Der Hochfeldmagnet arbeitet mit einem Hybrid-Magnetsystem. Dabei werden normalleitende und supraleitende Spulen in Reihe geschaltet und mit dem gleichen hohen Strom von 20.000 Ampere betrieben. In dieser Anordnung können die Betriebskosten gegenüber einem rein normalleitenden Magneten deutlich verringert werden. Die supraleitende Spule erzeugt ein Magnetfeld von bis zu 13 Tesla. Für die Kühlung und Stromversorgung wurde am HZB eine komplexe Infrastruktur aufgebaut.



Das Team hinter dem Hochfeldmagneten (oben v.l.): Daniel Süßmann, Prof. Dr. Bella Lake, Jochen Heinrich, Annette Daske, Wolf-Dieter Stein; (unten v. l.): Sebastian Gerischer, Dr. Hartmut Ehmler, Dr. Maciej Bartkowiak, Matthias Hoffmann, Dr. Norbert Stüßer, Robert Wahle, Dr. Peter Smeibidl und Stephan Kempfer.

### Planmäßiger Zieleinlauf

Eine so aufwändige Maschine wie den Hochfeldmagneten im Rahmen der Zeit- und Kostenpläne zu bauen, ist nur mit Hilfe von Controlling möglich. Verantwortlich für das Finanzcontrolling beim HFM-Projekt war Annette Daske. Die Betriebswirtin arbeitete dabei eng mit Dr. Hartmut Ehmler zusammen. Als Projektkoordinator hatte Ehmler neben seiner konzeptionellen Arbeit auch die Zeitplanung unter seiner Obhut. Mit den Daten des Finanzcontrollings war es dem Projektleiter Peter Smeibidl möglich, nachzusteuern, wenn es nötig wurde. Etwa beim Bau der Infrastruktureinrichtungen: Dort drohte der gesetzte Finanzrahmen überschritten zu werden. Doch das Team konnte noch umplanen. Mit einem neuen Konzept gelang es den Kollegen, das gleiche Ziel zu den ursprünglich vorgesehenen Kosten zu erreichen.

sz/hs

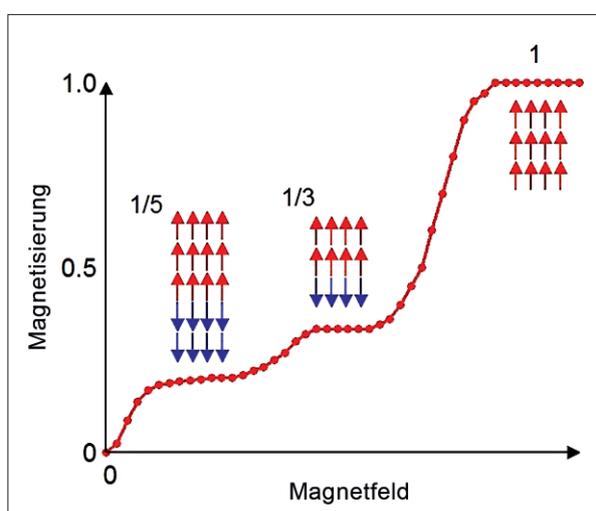
## „TEUFELSTREPPE“ IN EINEM SPIN-VENTIL-SYSTEM

Ein japanisch-deutsches Team hat an BESSY II in einem komplexen Kobaltoxid-Einkristall entdeckt, wie sich die Spins stufenweise zu einer ungewöhnlichen Anordnung formieren. Dies könnte neue **spintronische Bauelemente** ermöglichen.

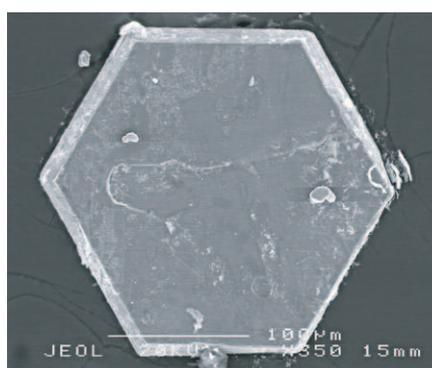
**M**aterialien mit komplexen magnetischen Strukturen gelten als interessante Kandidaten für Anwendungen in der Spintronik. Deren Ziel ist es, mit weitaus weniger Energieeinsatz Daten zu verarbeiten oder zu speichern. Ein bekanntes Beispiel ist das sogenannte Spin-Ventil, bei dem die Stromstärke, die durch das Element durchgelassen wird, empfindlich von der Anordnung der magnetischen Spins abhängt. In künstlichen Schichtsystemen können diese Anordnungen durch äußere magnetische Felder kontrolliert werden, was zu dem Riesenmagnetowiderstand-Effekt (Giant Magnetoresistance oder GMR) führt, für dessen Entdeckung Albert Fert und Peter Grünberg 2007 den Nobelpreis für Physik erhielten. Während klassische GMR-Systeme aus metallischen Schichten bestehen, die Forscher künstlich übereinander wachsen lassen, bieten oxidische Materialien eine interessante Alternative: Denn hier können sich Schichtstrukturen mit alternierenden magnetischen Konfigurationen intrinsisch einstellen. So weisen Kobaltoxide komplexe magnetische Ordnungen auf, die sich mit steigendem Feld verändern und sich zum Beispiel als Plateaus in der Magnetisierungskurve zeigen.

### Magnetische Strukturen kartiert

Ein japanisches Team um Prof. Hiroki Wadati, Universität Tokio, hat die magnetischen Strukturen in  $\text{SrCo}_6\text{O}_{11}$  am Hochfeld-Diffraktometer von BESSY II charakterisiert. Wie häufig bei der Synthese neuer Materialien, mussten sie mit winzigen Einkristallen arbeiten, die Durchmesser von gerade mal 0,2 Millimetern besaßen. Durch die extrem empfindliche Methode der resonanten Röntgenstreuung, eine Spezialität der Instrumentierung an der UE46\_PGM1 Beamline, gelang es ihnen jedoch an diesen Proben, die mit bloßem Auge kaum sichtbar sind, eine hochinteressante Beobachtung zu machen. Sie entdeckten eine sogenannte Teufelstreppe in der Spin-Anordnung. Dieses Phänomen tritt auf, wenn sich durch einen äußeren Parameter, hier ein magnetisches Feld, unzählige viele kommensurable (mit gleichem Maß messbare oder vergleichbare) Überstrukturen einstellen lassen. Dies geht weit über ein einfaches Spin-Ventil hinaus und könnte neue Anwendungen in der Spintronik ermöglichen.



Die Probe zeigt Plateaus in der Magnetisierung, die mit unterschiedlichen Spin-Anordnungen verbunden sind.



Der Durchmesser der hexagonalen Einkristalle aus  $\text{SrCo}_6\text{O}_{11}$  misst höchstens 0,2 Millimeter.

An der Forschungsarbeit war auch ein Team des Leibniz-Instituts für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden und des HZB beteiligt.

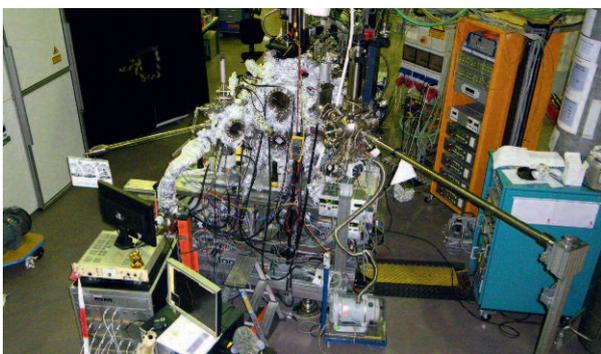
*Eugen Weschke*

Physical Review Letters 114, 236403 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.236403): Observation of a Devil's Staircase in the Novel Spin-Valve System  $\text{SrCo}_6\text{O}_{11}$ ; T. Matsuda, S. Partzsch, T. Tsuyama, E. Schierle, E. Weschke, J. Geck, T. Saito, S. Ishiwata, Y. Tokura and H. Wadati

## LEUCHTENDES DOUBLE

Lichtemittierende Halbleiter können für Displays oder die schnelle Datenverarbeitung und -übertragung eingesetzt werden. Doch den herkömmlichen Materialien lässt sich nur mühsam Licht entlocken. Forscher des HZB, der Berliner Humboldt-Universität und des Georgia Institute of Technology haben gezeigt, wie es in Zukunft besser geht: durch **geschickte Kombination** mit organischen Molekülen, die ebenfalls halbleitende Eigenschaften haben.

**H**olografische Displays, die Bilder dreidimensional darstellen können. Technologien zur digitalen Bildgebung in der Medizin, die einen detaillierten Blick in den menschlichen Körper ermöglichen. Optische ultraschnelle digitale Kommunikation. Die Palette an Anwendungen für lichtemittierende Halbleiter-Werkstoffe ist breit gefächert. Die große Herausforderung dabei: Die Ausbeute an dem begehrten Licht, das nach einer elektrischen Anregung des Materials entsteht, ist bei den heute gebräuchlichen anorganischen Halbleitern wie Silizium und



Die Experimente an den Hybrid-Halbleitern wurden an der Endstation SurlCat (Surface Investigation and Catalysis) von BESSY II durchgeführt.

Galliumnitrid gering. Der überwiegende Teil der Anregungsenergie geht durch andere Prozesse verloren. Zudem bieten die herkömmlichen Materialien kaum Möglichkeiten, die Wellenlänge und damit die Farbe des ausgesandten Lichts über weite Bereiche zu variieren.

„Eine Alternative stellen organische Halbleiter dar“, sagt Prof. Dr. Norbert Koch, Leiter der Arbeitsgruppe Molekulare Systeme am HZB. Sie haben genau dort ihre Stärken, wo es anorganischen Werkstoffen an Qualität mangelt. Viele organische Halbleiter sind exzellente optische Emittoren mit einer hohen Ausbeute an Licht in einem breiten und durchstimmbaren Frequenzbereich. „Der Nachteil solcher Halbleiter ist die geringe Beweglichkeit der Ladungsträger, von denen in organischen Substanzen außerdem nur recht wenige vorhanden sind“, erklärt Koch. Das macht organi-

sche Materialien zum Beispiel für die Anwendungen in der elektronikbasierten Datenübertragung, wo es auf hohes Tempo ankommt, ungeeignet. Umgekehrt können anorganische Halbleiter gerade bei diesen Merkmalen glänzen.

### Kombination von Halbleitern

Was also liegt näher, als anorganische und organische Halbleiter zu kombinieren? „So können sich die Vorteile beider Materialien addieren, während sich Nachteile gegenseitig ausgleichen“, erläutert Norbert Koch. Zusammen mit Forschern an der Berliner Humboldt-Universität sowie am Georgia Institute of Technology in Atlanta haben er und sein Team eine solche hybride Halbleiterstruktur realisiert und ihre elektronischen und optischen Eigenschaften im Detail untersucht. Die Wissenschaftler entwickelten eine neue Methode, mit der sich das hybride Material-Double besonders effizient als Lichtemitter einsetzen lässt. Zur Herstellung des Hybrid-Halbleiters verwendeten sie eine Kombination aus Zinkoxid – einem anorganischen kristallinen Halbleiterwerkstoff – und Oligophenyl. Die robuste organische Substanz ist ebenfalls halbleitend und wurde vom Chemiker Stefan Hecht an der Humboldt-Universität eigens entworfen und synthetisiert. Sie hat eine leiterähnliche molekulare Struktur aus Benzolringen, die über zusätzliche Kohlenstoff-Atome miteinander verbunden sind.

„Zunächst haben wir durch optische Anregung eine große Zahl von Elektron-Loch-Paaren im Zinkoxid erzeugt und sie dann in das organische Material übertragen“, berichtet Koch. Die Schwierigkeit dabei: Die Lage der Energieniveaus in den beiden Werkstoffen unterscheidet sich deutlich.

„Das führt dazu, dass zwar viele angeregte Zustände aus dem anorganischen in den organischen Halbleiter gelangen, aber ein großer Teil ihrer Anregungsenergie an der Grenzfläche nichtstrahlend verlorengeht“, sagt Koch. Die Ausbeute an Licht ist kärglich und taugt nicht für eine technische Anwendung. Um das zu ändern, griffen die Forscher zu einem Trick. Sie fügten zwischen die beiden Halbleiter eine zusätzliche dünne Materialschicht ein: ein sogenanntes Donormaterial, das die elektronische Struktur des Zinkoxids gezielt veränderte. „Dafür geeignete Moleküle

hatten unsere amerikanischen Partner am Georgia Tech bereits zuvor entwickelt“, berichtet Koch. „Durch den Einfluss des Donors glichen sich die Energieniveaus im anorganischen und organischen Halbleitermaterial einander an.“ Als Folge stieg der Anteil der Anregungen, die nach dem Übergang vom Zinkoxid ins Oligophenyl zur Lichtemission beitrugen, auf das Vielfache des Wertes, den die Forscher ohne Donorschicht gemessen hatten. Die Effizienz – der Anteil der Anregungsenergie, der in Licht verwandelt wird – erreichte so circa 35 Prozent.

„Das Ergebnis zeigt, dass unsere Methode gut funktioniert“, freut sich Norbert Koch. Doch der Materialforscher will noch mehr erreichen: „Die physikalischen Grundlagen haben wir damit verstanden, nun wollen wir 100 Prozent Effizienz erreichen“, hat er als Ziel ausgegeben. Daran arbeiten Koch und sein Team derzeit. „Unsere Idee ist es, einen weiteren

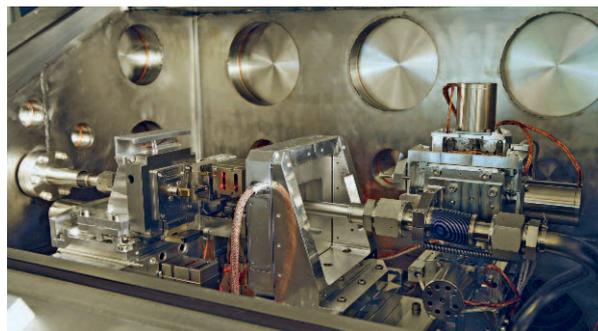
Halbleiter hinzuzufügen, der den nichtstrahlenden Energieverlust komplett verhindern könnte“, sagt Koch. „Aus solch einem Multihybrid-Material lassen sich künftig vielleicht Leuchtdioden bauen, die Licht mit sehr hoher Intensität bei fast jeder beliebigen Farbe erzeugen könnten – und deren Intensität dabei noch hochfrequent modulierbar sein kann.“ Für technische Anwendungen wie die schnelle optische Datenverarbeitung und -übertragung oder die Integration von elektronischen und photonischen logischen Schaltungen würde das einen enormen Fortschritt bedeuten. *rb*

Nature Communications 6, 6754 (DOI: 10.1038/ncomms7754): Efficient light emission from inorganic and organic semiconductor hybrid structures by energy-level tuning; R. Schlesinger, F. Bianchi, S. Blumstengel, C. Christodoulou, R. Ovsyannikov, B. Kobin, K. Moudgil, S. Barlow, S. Hecht, S.R. Marder, F. Henneberger and N. Koch

## MIKRO-BATTERIE IM RÖNTGEN-MIKROSKOP

Forscher des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Stuttgart haben mit Hilfe von **Scanning Transmission X-Ray Microscopy (STXM)** an BESSY II die Ursache für Alterungsprozesse in Lithium-Ionen-Akkus analysiert. Ihre Ergebnisse ebnen den Weg für längere Laufzeiten der Energiespeicher.

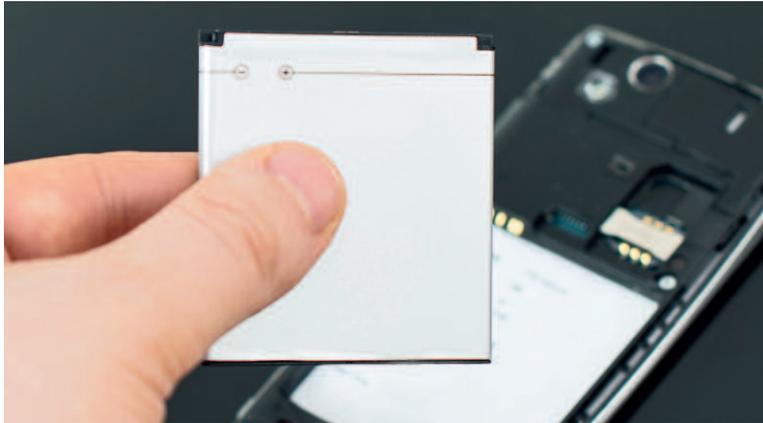
Die Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkus ist eigentlich recht einfach. Seine negative Elektrode besteht aus einer Lithium-Graphit-Struktur, die Elektronen abgibt, die ihrerseits das mobile Gerät mit Energie versorgen. Nach getaner Arbeit nehmen die positiv geladenen Eisen-Ionen in einer Elektrode aus Lithium-Eisenphosphat die negativ geladenen Elektronen auf. Bei diesem Vorgang würden sich beide Elektroden – die positiv geladene Lithium-Eisenphosphat-Elektrode und die negativ geladene Lithium-Graphit-Elektrode – elektrisch aufladen. Um das zu verhindern, wandern zusätzlich zu den Elektronen positiv geladene Lithium-Ionen von der negativen zur positiven Elektrode durch den Akku und gleichen so den Fluss negativ geladener Elektronen aus. Ist der Akku leer, schließt man ihn an eine Stromquelle an, die alle Reaktionen in die entgegengesetzte Richtung ablaufen lässt: Die Eisen-Ionen geben Elektronen ab, die durch die Leitung zum Graphit fließen und dort wieder aufgenommen werden. Und auch die Lithium-Ionen strömen zurück zur negativen Elektrode und verhindern so das elektrische Aufladen beider Elektroden.



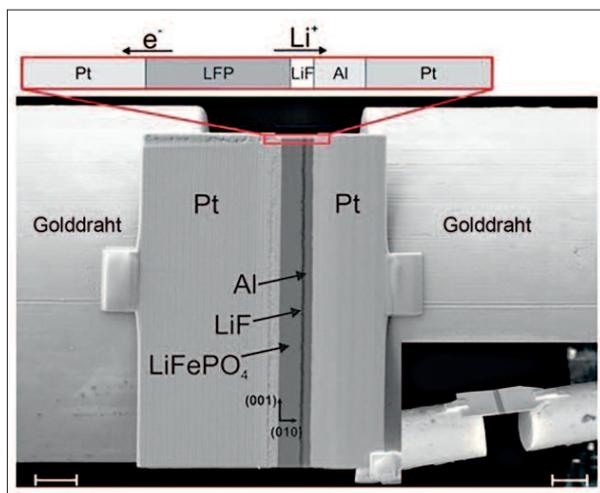
Die Analyse des Lade- und Entladevorgangs an Lithium-Ionen-Akkus fand an der von HZB und Max-Planck-Gesellschaft gemeinsam betriebenen Station MAXYMUS statt, die an der Undulator-Beamline UE46 an BESSY II angesiedelt ist.

### Komplexe Strukturen erschweren die Analyse

Bei der Suche nach den Alterungsprozessen, die mit der Zeit die Kapazität des Akkus verringern, stießen die Max-Planck-Forscher um Joachim Maier bei der Lithium-Eisenphosphat-Elektrode auf ein großes Hindernis. „Sie besteht aus Millionen winziger Kristalle, die unterschiedlich klein sind, in verschiedenen Richtungen in der Elektrode stecken



Die Vorgänge im Inneren von Lithium-Ionen-Akkus beim Laden und Entladen sind sowohl für die Wissenschaft als auch die Telekommunikations- und Automobilindustrie von größtem Interesse.



REM-Aufnahme von einem mikrometergroßen Akku: Die dünnschichtige Festkörperakkuzelle wird zwischen den Enden von zwei freistehenden Goldlitzen befestigt. Beim elektrochemischen Lithiumausbau wird das Elektron zum linken Platinkontakt transportiert, während das Lithium-Ion durch das Elektrolyt zur Aluminiumanode transportiert wird, wo es eine Lithium-Aluminium-Legierung bildet. Das Bild unten rechts zeigt eine Seitenansicht von einer ähnlichen Dünnschichtakkuzelle. Maßstab: zwei Mikrometer für die große Aufnahme, zehn für die kleine.

und sich auch noch in der Zusammensetzung voneinander unterscheiden“, erklärt der Materialwissenschaftler Robert Usiskin, der in der Gruppe von Joachim Maier arbeitet. Bei einem solch komplexen System sind die Erfolgchancen einer Analyse minimal. Also konstruierten die Forscher eine radikal vereinfachte Elektrode, die aus einem einzigen, winzigen Kristall aus Lithium-Eisenphosphat besteht. Der ist gerade einmal 16 Tausendstel Millimeter lang, einen Tausendstel Millimeter breit und 0,2 Tausendstel Millimeter hoch. An dieser Mikro-Elektrode untersuchten die Forscher, wie schnell die Lithium-Ionen beim Entladen des Akkus hineinwandern und beim Laden herauskommen und wie viele von ihnen überhaupt hineinpassen. Diese Werte geben

an, wie schnell ein solcher Akku Energie liefert und aufnimmt. Darüber hinaus können die Wissenschaftler daraus schließen, wie viel Energie er speichert.

Allerdings ist die Mikro-Elektrode viel zu klein, um sie mit herkömmlichen Methoden zu beobachten. Gisela Schütz vom Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme verwies die Kollegen ans HZB, denn Prozesse in derart kleinen Strukturen lassen sich am besten mit der Röntgen-Mikroskopie STXM (Scanning Transmission X-Ray Microscopy) an BESSY II unter die Lupe nehmen. Dabei tastet der Röntgenstrahl den Kristall ab und misst, wie viele dreifach positive und wie viele doppelt positive Eisen-Ionen an jeder Stelle vorhanden sind. Da beim Laden des Akkus die dop-

pelt positiven Eisen-Ionen je ein Elektron abgeben und dabei zu dreifach positiven Eisen-Ionen werden, schießt STXM eine Folge von Bildern des Ladevorgangs.

#### Gleichzeitiger Beginn an mehreren Stellen

Auf diesen Bildern des Röntgen-Mikroskops sahen die Forscher verblüffende Strukturen: „Die Eisen-Ionen geben die Elektronen nicht etwa entlang einer Grenzfläche ab, sondern beginnen die Reaktion an mehreren, nebeneinander liegenden Stellen gleichzeitig“, erklärt Robert Usiskin. Von diesen Punkten läuft die Reaktion in den Kristall hinein. So entstehen winzig kleine Nano-Nadeln aus dreifach positiven Eisen-Ionen, die von einigen doppelt positiven Eisen-Ionen voneinander getrennt nebeneinander liegen.

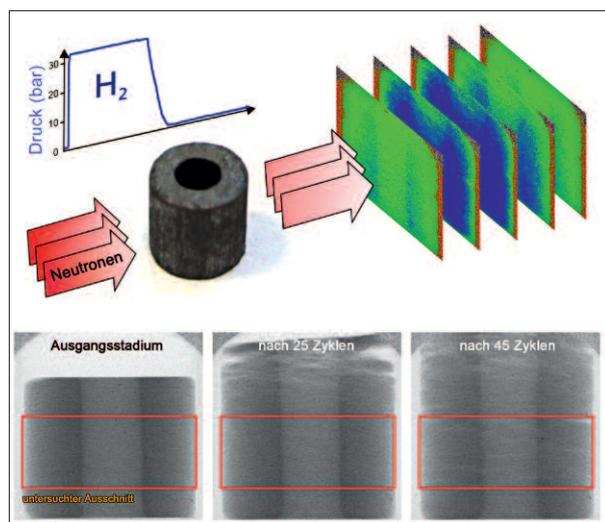
Gleichzeitig strömen die Lithium-Ionen aus dem Kristall heraus, um die Ladung auszugleichen. Dadurch verliert der Kristall an Masse und schrumpft ein wenig. Dieser Vorgang ist in der Längsrichtung deutlich stärker als in der Breite und Höhe. Diese mechanische Belastung lässt den Kristall zwischen den Nadeln mit dreifach positiven Eisen-Ionen reißen. „Auf den STXM-Bildern sieht man diese Risse deutlich“, berichtet Robert Usiskin. Diese Risse beschädigen mit der Zeit die Elektrode und verringern so die Kapazität des Akkus. Verwendet ein Hersteller kleinere Lithium-Eisenphosphat-Kristalle für seine positiven Elektroden, kann er diesen Effekt verringern, und der Akku altert langsamer. Das haben die Hersteller zwar schon vor den STXM-Experimenten gewusst. Seit die Forscher aber die genauen Vorgänge beschreiben, können sie diesen Alterungsschutz durch eine gezieltere Auswahl der Kristalle für die Elektrode weiter verbessern. rk

Nature Communications, 6:6045 (DOI: 10.1038/ncomms7045): Phase evolution in single-crystalline  $\text{LiFePO}_4$  followed by in situ scanning X-ray microscopy of a micrometre-sized battery; N. Ohmer, B. Fenk, D. Samuelis, C.-C. Chen, J. Maier, M. Weigand, E. Goering and G. Schütz

## WASSERSTOFFSPEICHERN BEIM WACHSEN ZUGESEHEN

Wasserstoff-Speichersysteme auf Basis von Hydrid-Graphit-Kompositen (HGK) haben ein hohes Anwendungspotenzial. Einem internationalen Team von Wissenschaftlern ist es erstmals gelungen, **Bildung und Wachstum aktiver Bereiche** in derartigen Verbindungen in operando, also während das System arbeitet, zu visualisieren.

Für den Einsatz erneuerbarer Energiequellen ist die Entwicklung von Technologien erforderlich, mit denen diese Energien gespeichert werden können. Wasserstoff ist ein vielseitig verwendbarer Energieträger, doch es müssen auch für ihn erst effiziente Speicherlösungen gefunden werden. Aufgrund ihrer hohen Speicherkapazitäten rückten jüngst besonders Metallhydride in den Fokus der Forscher. Derzeit sind viele hydridbildende Metalllegierungen bekannt, kommerziell genutzt werden jedoch nur wenige.



Neutronenaufnahme von einem Hydralloy®-basierten Hydrid-Graphit-Komposit mit 5 Gew.-% expandiertem Naturgraphit im Ausgangszustand, nach 25 und nach 45 Hydrierungs-Zyklen (dehydrierter Zustand). Der untersuchte Ausschnitt ist umrandet.

„Grund genug für uns, ein Komposit aus Naturgraphit und einer als Hydralloy® C52 bekannten Titan-Mangan-Legierung genau zu untersuchen“, sagt Dr. Ingo Manke vom Institut Angewandte Materialforschung am HZB, der die Arbeiten des Teams gemeinsam mit seinem Kollegen Dr. Nikolay Kardjilov an der Neutronenquelle BER II begleitet hat. „Wenn wir mehr über ihre Eigenschaften wissen, könnten diese vielseitigen Wasserstoffspeicher-Systeme zukünftig etwa zur Speicherung überschüssiger Energie aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen sowie in Brennstoffzellen-Autos verwendet werden.“

### Aktive Regionen nehmen mit Betriebszyklen zu

Mithilfe eines Versuchsaufbaus zur Visualisierung mit Neutronen untersuchten die Forscher sowohl das Aktivierungsverhalten als auch die Laufleistung des Materials. Zuvor wurden die HGK zur Aktivierung einer Vorbehandlung bei 125 Grad Celsius in einer Niederdruck-Wasserstoffatmosphäre (weniger als fünf bar) ausgesetzt, in der keine Hydrierung stattfindet. Anschließend waren einige Hydrierungs-Dehydrierungs-Zyklen des Speichermaterials erforderlich, bis die volle Aufnahmekapazität erreicht wurde. Aktive Regionen innerhalb der HGK schienen statistisch verteilt zu sein, das übrige HGK-Volumen blieb inaktiv. Zudem wuchsen die aktiven Regionen mit der Anzahl der Zyklen, wahrscheinlich aufgrund lokal erhöhter Temperaturen. Im finalen Zustand sind die aktiven Bereiche über das gesamte HGK-Volumen verteilt. In der Aktivierungsphase dehnt sich das Volumen der HGK kontinuierlich aus, was auf die Gitterausweitung des Wasserstoff absorbierenden Materials zurückzuführen ist. Im finalen, vollständig aktivierten Zustand nimmt die Gesamtausdehnung nicht mehr signifikant zu. Im zweiten Teil der Untersuchung wurde die (De-)Hydrierung von vollständig aktivierten HGK durchgeführt. Je eine schnelle und eine langsame Hydrierung und Dehydrierung beobachteten die Forscher mithilfe von Neutronenradiografie. Dabei zeigten sich im Inneren der HGK deutlich sichtbare Reaktionsfronten. Diese beginnen an der Behälterwand, wo die Wärmeübertragung am schnellsten ist. „Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Hydrid-Graphit-Komposits ermöglicht einen raschen Temperaturengleich. So kann eine sehr schnelle Be- und Entlade-Dynamik von weniger als einer Minute erreicht werden“, erläutert Dr. Nikolay Kardjilov. Die Bildung und das Wachstum aktiver Bereiche in Hydrid-Graphit-Kompositen konnten durch die Versuche zum ersten Mal visualisiert werden. Weitere Untersuchungen werden sich auf den Einfluss verschiedener (De-)Hydrierungsraten konzentrieren sowie auf die Ausdehnung des Speichermaterials. ve

Journal of Power Sources 277, 360-369, (DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.12.011): In operando visualization of hydride-graphite composites during cyclic hydrogenation by high-res neutron imaging; C. Pohlmann et al.

## WAS MACHT KATALYSATOREN EFFIZIENT?

Auf der Suche nach einem **effizienten Katalysator** für die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff haben Wissenschaftler von der Freien Universität Berlin am HZB untersucht, ob die Reaktion eher an der Oberfläche oder im Inneren des Materials abläuft.

**D**ie sehr energieaufwändige Produktion von Wasserstoff verhindert bislang den großflächigen Einsatz dieses Elements als Energieträger für eine nachhaltige Energieversorgung. Um Wasserstoff oder andere Kraftstoffe mit niedrigem Kohlenstoffanteil umweltfreundlich erzeugen zu können, wird daher nach effizienten Methoden für deren Herstellung gesucht. Zentral ist hierbei die durch Licht oder Elektrizität angetriebene Wasseroxidation. Ziel ist es, ein stabiles katalytisches System zu entwickeln, das insbesondere eine hohe Umsatzfrequenz und daneben niedrige elektrische Verluste aufweist.

Dazu ging die Gruppe von Prof. Dr. Holger Dau von der Freien Universität Berlin der Frage nach, ob die katalytischen Funktionen an der Oberfläche oder in der Masse, also innerhalb eines Materials erfüllt werden. Von der Antwort hängt es wesentlich ab, ob eine Kristall-basierte Oberfläche oder ein amorpher – quasi poröser – Zustand des gesamten Materials besser für die Katalyse geeignet ist. Im Fokus stand die Untersuchung von anfänglich kristallinem Kobalt-Phosphat (PAK).



Forscher untersuchen am HZB Materialien und Prozesse für noch effizientere Katalysatoren zur Spaltung von Wasser durch Sonnenlicht.

Dem Team gelang es, die Umwandlung der atomaren Struktur von PAK mithilfe von Röntgenspektroskopie zu verfolgen. Nach Aufbringen des mikrokristallinen PAK auf eine Elektrode wurde eine positive Spannung angelegt, und die

Kristallite wandelten sich in mehreren Stunden vollständig zu amorphem, phosphathaltigem Kobaltoxid um. Dieses besteht aus katalytischen Oxidclustern in einer atomarporösen Umgebung mit eingelagerten Wasserschichten. Bei dem Umwandlungsprozess erhöht sich die gesamte katalytische Aktivität deutlich. „Während anfangs die Katalyseprozesse an der Oberfläche vorherrschen, führt die Auflösung der kristallinen Ordnung später zu einer stärkeren Reaktivität innerhalb des hydratisierten Oxids“, erläutert Holger Dau und erklärt weiter: „Für die Entwicklung zukünftiger Katalysatorgenerationen ist es wichtig zu wissen, dass sowohl Kristallite mit großer Oberfläche als auch durchgängig nichtkristalline, amorphe Oxide als Katalysatormaterial spezifische Vorteile bringen können.“

### Reaktion wandert von außen nach innen

Im Ergebnis steht für das Forscherteam fest, dass bei der Oxidation von Wasser mit einem unlöslichen Katalysatormaterial sowohl die Oberflächen- als auch die Volumenkatalyse innerhalb des Materials berücksichtigt werden müssen, um effiziente Ergebnisse zu erzielen. Dazu zählt die dynamische Umstrukturierung und Transformation des Katalysatormaterials während der Reaktion. Die Forscher empfehlen weitere Experimente, um die Charakteristika und die Rate der Restrukturierung besser bestimmen zu können. Diese Prozesse werden von Faktoren wie der (kristallinen) Struktur und den Reaktionsbedingungen (pH-Wert, elektrisches Potenzial, Temperatur) beeinflusst. Für die Katalysatorforschung zeigen die Ergebnisse klar, dass Effizienzsteigerungen möglich sind. Das Team um Holger Dau wird in künftigen Untersuchungen neuer Katalysatoren daher nicht nur Veränderungen in der Kristallgitterstruktur, sondern auch die Umwandlung in nichtkristalline Strukturen in den Fokus stellen. ve

Angew. Chem. 2015, 127, 2502–2506 (DOI: 10.1002/ange.201409333): Heterogeneous Water Oxidation: Surface Activity versus Amorphization Activation in Cobalt Phosphate Catalysts; D. González-Flores, I. Sánchez, I. Zaharieva, K. Klingan, J. Heidkamp, P. Chernev, P. W. Menezes, M. Driess, H. Dau and M. L. Montero

## BESSERE AKKUS DURCH NANOPOREN

Lithium-Schwefel-Akkus erlauben theoretisch eine **hohe Ladekapazität**, praktisch können sie aber noch nicht eingesetzt werden, da sie sich nach wenigen Ladezyklen auflösen. Ein Wissenschaftler von der Universität Hamburg hat am HZB Untersuchungen durchgeführt, wie sich dieser Prozess aufhalten lässt.

**S**imone Mascotto ist praktisch Stammkunde am HZB. Die knapp 300 Kilometer von der Elbe bis zur Spree fährt der Materialwissenschaftler aus einem nahegelegenen Grund mit der Bahn und nicht mit dem Elektroauto: Das Fahrzeug bliebe spätestens auf halber Strecke liegen, weil die heute verwendeten Lithium-Ionen-Akkus erschöpft wären. Um das zu ändern, forscht Simone Mascotto an Kohlenstoff-Materialien mit Nanoporen, die als Elektroden in Lithium-Schwefel-Akkus eingesetzt werden können. Lithium-Schwefel-Akkus können – im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus, die heute Elektro-Autos, Smartphones und Kameras antreiben – ein Vielfaches an Energie speichern. In Lithium-Schwefel-Akkus fließen beim Entladen Elektronen durch eine Leitung von einer Elektrode zur anderen und treiben auf diesem Weg den Elektromotor an. Gleichzeitig wandern positiv geladene Lithium-Ionen in gleicher Richtung zwischen den Elektroden, nehmen dabei aber den direkten Weg durch den Akku selbst. Dort angekommen verbinden sie sich mit dem Schwefel in der Elektrode zu Lithium-Polysulfiden. Beim Laden kehren sich diese Prozesse wieder um. Allerdings lösen sich die beim Entladen entstehenden Lithium-Polysulfide im Akku leider auf und wandern dabei von der Elektrode weg. Schon nach wenigen Ladezyklen fehlt der Schwefel und die Elektrode wird unbrauchbar. Mit solch einem Energiespeicher könnte Mascotto zwar ohne Tankstopp von Hamburg nach Berlin fahren, aber er müsste schon nach wenigen Reisen den teuren Akku austauschen. Daher will er dieses Abwandern verhindern und die Lithium-Polysulfide in den Nanoporen eines Kohlenstoff-Materials einsperren, das er am HZB untersucht.

### Abwanderung von Schwefel aufhalten

„Gelingt das, sollte ein Lithium-Schwefel-Akku mehr als tausend Mal geladen werden können“, erklärt Mascotto. Das Kohlenstoff-Material mit den Nanoporen stellt er mit einem raffinierten Verfahren in Hamburg her. Wie gut die Substanz sich als Elektrode eignet, sieht der Forscher aber erst an ihrer genauen Struktur: Wie groß sind die Poren tatsächlich, wie verteilen sie sich, wie groß ist ihre gesamte Oberfläche, an der sie Schwefel festhalten können und wie



Noch sind die geringen Ladekapazitäten ein Hemmschuh für den Verkauf von Elektroautos. Mit Lithium-Schwefel-Akkus könnte sich das ändern.

gut leitet das Material den elektrischen Strom? Einige Antworten auf diese Fragen erhält Mascotto, wenn er den Kohlenstoff mit den Nanoporen vier Stunden lang im Neutronenstrahl des Berliner Forschungsreaktors BER II platziert. Gleichzeitig füllt der Forscher die Flüssigkeit Para-Xylol in die Poren, die im flachen Winkel auftreffende Neutronenstrahlen genauso streut wie das Kohlenstoff-Material. Während die leeren Poren im Material in den Streuungskurven deutlich zu sehen sind, verschwinden sie, sobald sie mit Para-Xylol gefüllt sind. Das Ergebnis dieses aufwändigen und so nur am BER II durchführbaren Experimentes zeigt die Struktur des Elektroden-Materials sehr detailliert. Ein Viertel der gesamten Oberfläche stellen größere Poren zur Verfügung, die etwa zehn Nanometer (Millionstel Millimeter) groß sind. Dazwischen liegen viele kleinere Poren, die nur einen Nanometer Durchmesser haben und die vor den großen Poren gefüllt werden. Diese Struktur möchte Mascotto nun optimieren. Welche Struktur und Anordnung der Poren die besten Ergebnisse bringt, wird er in weiteren Experimenten herausfinden. Sie könnten der Elektromobilität zum Durchbruch verhelfen. *rk*

Carbon, (DOI: 10.1016/j.carbon.2014.10.086): Poly(ionic liquid)-derived nanoporous carbon analyzed by combination of gas physisorption and small-angle neutron scattering: S. Mascotto et. al

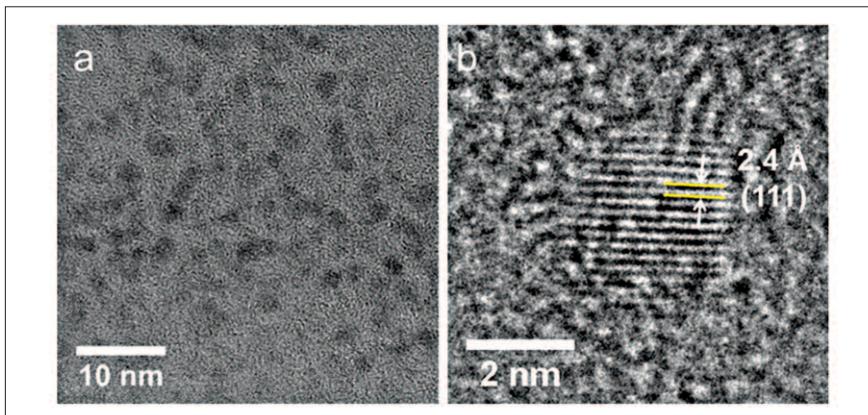
## WINZLINGE FÜR DIE WASSERSPLATUNG

Das **Speichern von Strom in Wasserstoff**, der per Elektrolyse aus Wasser gewonnen wird, gilt als entscheidender Baustein des künftigen Energiesystems. Neuartige Nanopartikel mit exzellenten Eigenschaften könnten der Methode wirtschaftlich zum Durchbruch verhelfen.

**E**rneuerbare Energiequellen stellen die Netzbetreiber vor ein gravierendes Problem: Da die erzeugte Menge an Wind- und Solarstrom je nach Wetterlage sehr stark schwankt, sind neuartige Technologien erforderlich, um den gerade nicht benötigten Strom vorübergehend zu speichern. Besonders viel Potenzial dafür bietet die Wasserelektrolyse, bei der Wasser mithilfe elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Die im Wasserstoff gebundene Energie lässt sich zu einem späteren Zeitpunkt in Gaskraftwerken wieder in Strom verwandeln, zum Antrieb von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren oder als Rohstoff für die chemische Industrie verwenden.

an der Ludwig-Maximilians-Universität München hat gemeinsam mit Forscherkollegen aus Düsseldorf und Berlin ein interessantes Material entwickelt, das die elektrolytische Oxidation von Wasser deutlich effizienter macht. Dabei nutzte das Forscherteam auch experimentelle Einrichtungen des HZB, um tief in den innovativen Werkstoff hineinzublicken.

Basis des neuen, hochwirksamen Katalysatormaterials ist Nickeloxid, das Dina Fattakhova-Rohlfing und ihr Team mit Eisenatomen spickten – die Wissenschaftler sprechen von „Dotieren“ – und einem eigens dafür geschaffenen Syntheseprozess unterzogen. Die Chemiker lösten das Material in tert-Butanol und erhitzen es im Laborofen etwa 20 Stun-



TEM-Aufnahmen von den  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}\text{O}$  Nanopartikeln: (a) Übersicht der auf dem TEM-Gitter verteilten Nanopartikel. (b) HRTEM-Aufnahme von einem einzelnen  $\text{Fe}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}\text{O}$ -Nanopartikel.

### Das HZB ermöglicht tiefe Einblicke in Werkstoffe

Allerdings benötigt die elektrolytische Spaltung von Wasser einen Katalysator, der die chemischen Reaktionen beflügelt. Vor allem die Oxidation des Wassers zu Sauerstoff – neben der Reduktion zu Wasserstoff einer von zwei Prozess-Schritten bei der Elektrolyse – bereitet den Chemikern Probleme. Um sie zu beschleunigen, kommen heute meist Verbindungen mit seltenen Edelmetallen wie Ruthenium oder Iridium zum Einsatz – was die Wasserspaltung teuer macht. Deshalb suchen Forscher nach kostengünstigeren Katalysatormaterialien.

„Die chemische Produktion von Sauerstoff ist der begrenzende Faktor in der Reaktionskette der Wasserspaltung“, betont Prof. Dr. Dina Fattakhova-Rohlfing. Die Chemikerin

den lang auf 200 Grad Celsius. Als Ergebnis erhielten sie extrem kleine nickel- und eisenhaltige Partikel mit teils weniger als zwei Nanometer Durchmesser.

### Nanopartikel vergrößern die Reaktionsfläche

Diese Winzlinge haben es in sich: Da sie so klein sind, haben sie eine im Vergleich zum Volumen sehr große Oberfläche, die eine sehr starke katalytische Wirkung hat. „Bei der elektrolytischen Spaltung von Wasser sind die Eisen-Nickel-Nanopartikel etwa zehnmal so effektiv wie die bislang eingesetzten Edelmetallverbindungen“, sagt Fattakhova-Rohlfing. Dazu trägt neben ihrer winzigen Dimension auch ein hoher kristalliner Charakter der Teilchen bei. Die sind außerdem außerordentlich stabil: Selbst über viele Hundert

Oxidationszyklen hinweg konnten die Forscher keine Abnutzung des Materials feststellen.

Um die genaue Struktur der außergewöhnlichen Nanoteilchen sowie den Gehalt und die Verteilung der Eisen-Atome darin zu analysieren, nutzten die Wissenschaftler ein Röntgenelektronen-Spektrometer am HZB. „Dieses Verfahren ist eine der wenigen experimentellen Methoden, mit denen es gelingt, die unmittelbare Umgebung einzelner Atome sichtbar zu machen“, erklärt Fattakhova-Rohlfing. „Uns gelang es damit, den Aufbau der Partikel vollständig aufzuklären.“ Dabei arbeitete das Team der Münchner Wissenschaftlerin eng mit Forschergruppen um Dr. Ivelina Zaharieva vom Institut für Physik, Biophysik und Photosynthese der Freien Universität Berlin und Prof. Christina Scheu vom Düsseldorfer Max-Planck-Institut für Eisenforschung zusammen. Die Ergebnisse der Messungen am HZB offenbarten ein wichtiges Strukturdetail des Materials: Bei der Synthese der Nanoteilchen bilden sich sogenannte metastabile Phasen, die zu ungewöhnlichen Zusammensetzungen von Eisen und Nickel führten – und die die katalytische Wirkung verstärken.

#### Ein Verfahren für viele Anwendungen

Dina Fattakhova-Rohlfing sieht in den Erkenntnissen einen großen Schritt hin zu einer hocheffizienten und kostengünstigen Elektrolyse von Wasser – und damit zur wirtschaftlich

rentablen Speicherung von regenerativ gewonnener elektrischer Energie in Form von Wasserstoff. Denn die höchst aktiven Nanoteilchen bieten eine gute Möglichkeit, um verschiedene Formen von Katalysatoren zu realisieren. Die Partikel lassen sich einfach herstellen, sind gut zu verarbeiten und vielseitig einsetzbar. Daraus lassen sich zum Beispiel wenige Nanometer dünne gleichmäßige Schichten auf diverse Elektrodenmaterialien auftragen, oder sie können als einzelne kleine Kristallteilchen in poröse Strukturen integriert werden. Kein Wunder, dass mehrere Industrieunternehmen bereits Interesse an dem neuen Katalysator-material bekundet haben.

Für die Forscher um Dina Fattakhova-Rohlfing hat die Arbeit daran allerdings erst begonnen: „Wir wollen ähnliche Partikel nun auch mit anderen Systemen und Dotiermaterialien herstellen, andere Syntheseverfahren testen und zu noch kleineren Nanoteilchen kommen“, sagt die Münchner Forscherin. Sie hofft, dass sich die Effizienz Wasserspaltung dadurch weiter verbessern lässt.

rb

ACS Nano, Vol. 9, No. 5, 5180-5188 (DOI: 10.1021/acs.nano.5b00520): Iron-Doped Nickel Oxide Nanocrystals as Highly Efficient Electrocatalysts for Alkaline Water Splitting; K. Fominykh, P. Chernev, I. Zaharieva, J. Sicklinger, G. Stefanic, M. Döblinger, A. Müller, A. Pokharel, S. Böcklein, C. Scheu, T. Bein and D. Fattakhova-Rohlfing

## ANGRIFF AUF DIE ACHILLESFERSE VON HIV

Wissenschaftler des Universitätsklinikums Heidelberg und der Akademie der Wissenschaften in Prag haben die **Reifung des AIDS-Erregers HIV** untersucht. Ihre Ergebnisse zeigen neue Möglichkeiten für die Bekämpfung der Immunschwächekrankheit auf.

**A**uch gefährliche Viren haben eine Schwachstelle, an der ihr sonst nur schwer angreifbarer Lebenszyklus verwundbar ist. Eine solche Achillesferse ist beim Humanen Immundefizienz-Virus (HIV) die Reifung. Nach einer Infektion zwingt das Virus die betroffenen Zellen eines Menschen dazu, massenweise neue Viren zu produzieren. Neue Erreger entstehen in Form winziger Kügelchen, die zwar alle Bestandteile von HIV enthalten, aber zunächst einmal ungefährlich sind. In dieser Gestalt können sie nämlich keine weiteren Zellen eines Menschen infizieren und diese zur Produktion neuer Viren zwingen. Erst wenn ein Enzym aus den Viren selbst die Kügelchen kräftig

umbaut und aus ihnen die typische Kapsid-Form reifer Viren macht, werden die jungen Erreger infektiös.

Inzwischen gibt es mehrere Wirkstoffe, die dieses „HIV-Protease“ genannte Virus-Enzym blockieren und so zur Therapie von an AIDS erkrankten Patienten eingesetzt werden können. Noch immer aber tappen die Forscher bei der Frage im Dunkeln, wie dieser komplizierte Umbau des Erregers im Detail funktioniert. Wäre dieser Prozess genauer bekannt, könnten neue Wirkstoffe entwickelt werden, die einzelne Schritte dieser Reifung gezielt attackieren und so den Erreger mit neuen Medikamenten außer Gefecht setzen.

### Winzige Größe und nicht synchrone Reifung

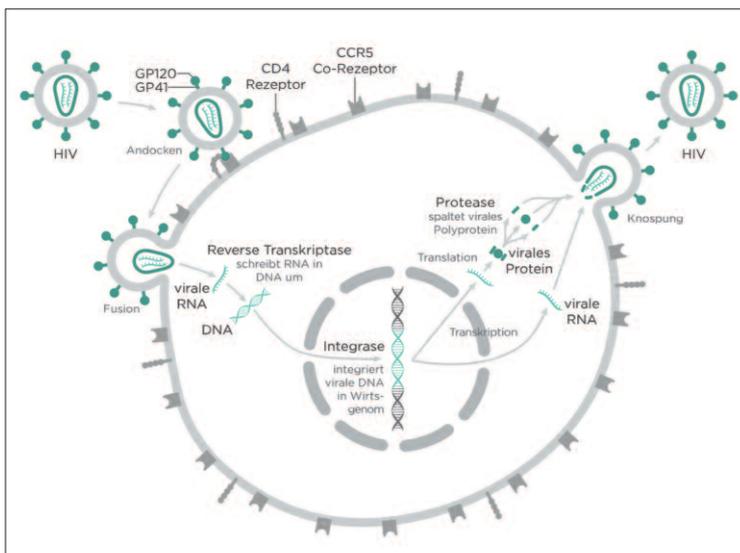
Barbara Müller vom Department für Infektiologie des Universitätsklinikums Heidelberg und ihre Kollegen in Prag und Heidelberg haben daher gute Gründe, den Wandel der zunächst entstehenden unreifen Kügelchen zum gefährlichen Virus genau unter die Lupe zu nehmen. „Auf dem Weg dorthin müssen wir allerdings einige Hindernisse überwinden“, erklärt Müller. Eine dieser Hürden ist die winzige Größe des HIV von gerade einmal 150 Nanometern und damit 0,15 Tausendstel eines Millimeters. Für ein Lichtmikroskop ist das zu klein, aus physikalischen Gründen können Lichtstrahlen nur Strukturen auflösen, die größer als etwa 200 Nanometer sind. Ein Elektronenmikroskop zeigt zwar erheblich kleinere Strukturen, kann aber nur „Schnappschüsse“ machen und bietet daher denkbar schlechte Voraussetzungen, einen Umbau detailliert zu beobachten.

Obendrein entstehen in einer Zelle Tausende Virusknospen nicht etwa gleichzeitig, sondern jede von ihnen nach einem eigenen Zeitplan. Analysieren die Forscher das Reifen der Viren daher mit den Methoden der Biochemie, beobachten sie eine Mischung aus verschiedenen Stadien der Entwicklung. Ein Wandel lässt sich so kaum untersuchen. Es sei denn, die Forscher stoppen die Entwicklung aller Viren, solange sie noch ihre runde Knospennform haben. Schaffen sie es, diese Blockade schlagartig und gleichzeitig für alle Winzlinge aufzuheben, reifen die Viren synchron und können so mit erprobten Methoden biochemisch unter die Lupe genommen und beobachtet werden.

### Wichtiger Zwischenschritt an BESSY II untersucht

Einen solchen Synchronisierungsmechanismus haben Jan Konvalinka und seine Mitarbeiter im Institut für Organische Chemie und Biochemie der Akademie der Wissenschaften in Prag entwickelt. Ausgangspunkt war einer der als Medikament eingesetzten Wirkstoffe, mit denen die HIV-Protease außer Gefecht gesetzt wird. Daran haben die tschechischen Biochemiker ein zweites Molekül-Teil angehängt, das empfindlich für blaues Licht mit einer Wellenlänge von 405 Nanometern ist. Eine Kristallstrukturanalyse mit der Synchrotronstrahlung von BESSY II, die an der vom Joint Berlin MX-Laboratory betriebenen Beamline 14.2 durchgeführt wurde, zeigte den tschechischen Forschern, dass dieses Kombi-Molekül die HIV-Protease fest an sich bindet und sie damit blockiert. Erst wenn das Blaulicht eingeschaltet wird, zerfallen der Wirkstoff und sein Anhängsel rasch und beenden so die Blockade der Protease, die dann die Reifung aller Virusknospen gleichzeitig einleitet.

Dank dieser Entwicklung konnten Barbara Müller und ihre Kollegen im Heidelberger Labor mit biochemischen Metho-



Schematische Darstellung des Replikationszyklus von HIV, der in den vom Virus befallenen Zellen tausendfach stattfindet. Um neue Wirkstoffe gegen den HIV-Reifungsprozess entwickeln zu können, haben Wissenschaftler den Prozess in größtmöglicher Auflösung untersucht.

den diesen Prozess untersuchen. Vorher haben sie Zellkulturen mit HIV infiziert und dabei den in Prag entwickelten, Blaulicht-empfindlichen Wirkstoff zugegeben. Weil dieser erst das Reifen der Viren unterbindet, entwickeln sich die Virusknospen normal. Diese nicht-infektiösen Jungviren isolierten die Forscher und bestrahlten sie mit Blaulicht. Schlagartig blockierte der Wirkstoff die HIV-Protease zehntausend Mal schlechter als vorher, zeigten die Ergebnisse. Die Blockade endete nach Einschalten des Blaulichts also praktisch komplett, die Virusknospen konnten daher gleichzeitig beginnen zu reifen. Mit den Methoden der Biochemie beobachteten die Forscher nun, wie die Protease die beiden vorhandenen Strukturproteine in kleinere Teile zerlegte.

Diesen Vorgang wollen Hans-Georg Kräusslich von der Heidelberger Uniklinik und seine Kollegen unter anderem mit einem neuartigen Fluoreszenzmikroskop beobachten, das der Nobelpreisträger Stefan Hell vom Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen gemeinsam mit Kollegen entwickelt hat. Ohne die Auflösungsgrenze anzutasten, verbessern einige Tricks die Auflösung dieses Lichtmikroskops so, dass die reifenden Viren gerade noch sichtbar sind. Die Chancen für die Entwicklung neuer Wirkstoffe gegen den HIV-Reifungsprozess könnten dadurch steigen.

rk

Nature Communications, 6:6461 (DOI: 10.1038/ncomms7461): Triggering HIV polyprotein processing by light using rapid photodegradation of a tight-binding protease inhibitor; J. Schimer, M. Páková, M. Anders, P. Páchl, P. Sába, P. Cígler, J. Weber, P. Majer, P. Rezáková, H.-G. Kräusslich, B. Müller and J. Konvalinka

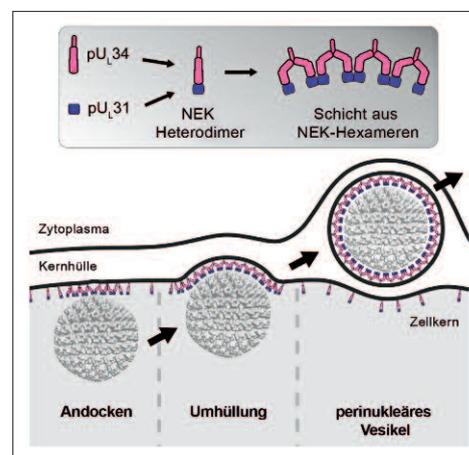
## SCHWERTRANSPORT IM ZELLINNEREN

Ein internationales Forscherteam hat an BESSY II mit dem Röntgenmikroskop und weiteren Methoden erstmals die **Vermehrung von Herpesviren im Zellkern** und deren Ausbreitung in der Zelle beobachtet. Dank raffinierter Optiken konnten die Forscher einzelne Zellbestandteile wie den Zellkern mit einer Auflösung von nur zehn Nanometern durchleuchten.

Um die Ausbreitung von Viren zu verstehen, erfordern Zellbiologen die Vorgänge im Inneren der von ihnen befallenen Zellen. Eine Vielzahl modernster Beobachtungsmethoden kommt dabei zum Einsatz. Eine zentrale Rolle spielt das Röntgenmikroskop am Synchrotron BESSY II, mit dem Prof. Dr. Gerd Schneider und seine Kollegen am HZB-Institut für Weiche Materie und funktionale Materialien inzwischen Strukturen sichtbar machen, die nur zehn Nanometer, also gerade noch ein Hunderttausendstel eines Millimeters groß sind. Mit raffinierten Linsen haben die Wissenschaftler diese Auflösung erreicht, die neben dem HZB nur wenige Einrichtungen weltweit bieten. Zwar sehen Forscher mit einem Elektronenmikroskop noch zehn Mal kleinere Teilchen, allerdings klappt das nur, wenn sie Zellen vorher in hauchdünne Scheiben schneiden. „Unser Röntgenmikroskop durchleuchtet dagegen ganze Zellen“, beschreibt Gerd Schneider den großen Vorteil dieser Methode. Damit konnten Forscher am HZB von Herpesviren befallene Zellen während einer Infektion beobachten. „Diese winzigen Erreger bringen einen Zellkern in ihre Gewalt und übernehmen dort das Kommando“, erklärt HZB-Forscher Dr. James McNally. Statt die Prozesse in seiner Zelle zu steuern, produziert der Zellkern nun Viruspartikel, aus denen neue Erreger zusammengesetzt werden. Allerdings muss der Erreger diese verhältnismäßig großen Teilchen noch durch eine doppelwandige Membran bringen, die den Zellkern vom Rest der Zelle abschottet. In dieser Kernmembran gibt es zwar eine Reihe von Poren, über die sich der Zellkern mit wichtigen Molekülen versorgt. „Die sind allerdings nur 30 Nanometer groß, ein Virus erreicht dagegen eine Größe von bis zu 200 Nanometern“, beschreibt Schneider die Lage.

### Markierte Proteine weisen den Weg

Die Erreger lösen das Problem mit einem Transportmechanismus, mit dem der Zellkern ohnehin Teilchen ausschleust, die zu groß für die Poren in der Kernmembran sind. Zellbiologen wollten diesen erst vor wenigen Jahren entdeckten Vorgang genauer unter die Lupe nehmen. „Mit unserem Röntgenmikroskop sehen wir die Membran um den Zellkern sehr gut“, sagt Gerd Schneider. Und so fanden die Forscher



Schematische Darstellung der Stadien vom Vesikel-vermittelten Austritt von Herpesvirus-Kapsiden aus dem Zellkern: Umhüllung durch den nuklearen Egress-komplex (NEK) an der inneren Kernmembran und Fusion der Vesikel mit der äußeren Kernmembran führen zur Enthüllung und Freisetzung des Kapsids in das Zytoplasma.

damit auch Hinweise, wie die Herpesviren von der doppelwandigen Kernmembran eingeschlossen und wieder freigegeben werden.

Um den „Schwertransporter“ möglichst genau zu analysieren, wollten sie wissen, mit welchen Proteinen die Viren die bei diesem Vorgang entstehenden Transportstrukturen aufschließen. „Dabei hilft die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie“, erklärt James McNally. Die Forscher haben deshalb einzelne Proteine der Viren mit einem Fluoreszenzfarbstoff markiert. Farbblitze unter dem Fluoreszenzmikroskop verraten dann das jeweilige Protein und damit seine Position. Mit dieser Methode sehen die Forscher zwar die kleinen Strukturen nicht direkt, können sie aber bei einem Vergleich mit den Ergebnissen der Röntgenmikroskopie ermitteln. Für eine noch detailliertere Betrachtung der Strukturen kamen auch noch das Elektronenmikroskop und weitere Verfahren zum Einsatz. Mit dieser Kombination verschiedener Methoden können die Forscher jetzt die Schwertransporter genauer untersuchen, die nicht nur für die Vermehrung von Viren wichtig sind, sondern anscheinend bei vielen zentralen Prozessen in der Zelle eine Rolle spielen.

rk

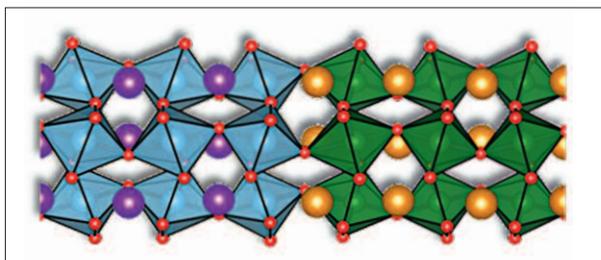
Cell 163, 1692–1701 (DOI: 10.1016/j.cell.2015.11.029): Structural Basis of Vesicle Formation at the Inner Nuclear Membrane; C. Hagen et. al.

## SANDWICHES AUS METALLOXIDEN

Eine französisch-deutsche Kooperation hat ein Schichtsystem aus Übergangsmetalloxiden an BESSY II untersucht. Dabei entdeckten die Wissenschaftler eine neue Möglichkeit, Eigenschaften der Grenzfläche gezielt zu verändern. Damit könnte man **neue Formen der Hochtemperatur-Supraleitung** erzeugen.

Sogenannte Sandwich-Systeme aus dünnen Schichten von Übergangsmetalloxiden zeigen oft überraschende Eigenschaften an den Grenzflächen. Das Paradebeispiel ist eine Doppelschicht aus Lanthan-Aluminat ( $\text{LaAlO}_3$ ) und Strontium-Titanat ( $\text{SrTiO}_3$ ): Während die beiden Oxid-Schichten im Inneren des Materials elektrisch isolierend und unmagnetisch sind, beobachtet man an der Grenzfläche der beiden Schichten Ferromagnetismus, hohe Leitfähigkeit und unter bestimmten Bedingungen sogar Supraleitung.

Nun hat ein Team um Dr. Manuel Bibes vom CNRS in Thales, Frankreich, gemeinsam mit internationalen Partnern einen neuen Ansatz gefunden, um die Eigenschaften von Grenzflächen gezielt zu steuern. Zusammen mit Dr.



Die Skizze zeigt den Aufbau der beiden Metalloxidschichten. Die interessanten neuen Eigenschaften zeigen sich genau an der Grenzfläche.

Sergio Valencia und weiteren Wissenschaftlern vom HZB konzipierten sie eine Versuchsreihe an BESSY II, um mehr darüber zu erfahren, wie sich die Materialeigenschaften ändern. Dabei entdeckten sie eine Möglichkeit, wie man diesen Prozess steuern kann.

### Seltene-Erd-Elemente verändern den Ladungstransfer

Das Team um Manuel Bibes stellte zunächst Doppelschichten aus extrem dünnen Metalloxid-Filmen her, einen Gadolinium-Titanat ( $\text{GdTiO}_3$ )-Film und einen „R“-Nickelat ( $\text{RNiO}_3$ )-Film, wobei „R“ ein Element aus der Gruppe der Seltenen Erden ist. „Es ist uns damit gelungen, zwei sehr unterschiedliche Übergangsmetalloxide zu kombinieren. Während in der chemischen Bindung der Titanat-Schicht

die Elektronen stark um die Ionen lokalisiert sind, sind sie in der Nickelat-Schicht im Rahmen kovalenter Bindungen zwischen den Sauerstoff- und Nickel-Ionen verteilt“, erklärt Manuel Bibes. An der Grenzfläche wandern daher einige Ladungsträger aus der Titanat- in die Nickelat-Schicht. Diesen Prozess untersuchten die Wissenschaftler anhand von Proben mit unterschiedlichen Elementen der Seltenen Erden: Lanthan, Neodym und Samarium.

An BESSY II konnten sie nun erstmals beobachten, dass der Ladungstransfer zwischen den beiden Schichten vom Seltene-Erd-Element in der Nickelat-Schicht abhängt. Die unterschiedlichen Elemente der Seltenen Erden besitzen verschiedene Atomradien. Dies beeinflusst die Wechselwirkungen zwischen den Nickel- und Sauerstoff-Atomen und damit auch die sogenannte Kovalenz und ihren Anteil an der chemischen Bindung. Dies ist soweit bekannt; aber die Wissenschaftler konnten nun erstmals beobachten, dass sich die Stärke der Kovalenz wiederum auf den Ladungstransfer von der Titanat- in die Nickelat-Schicht auswirkt. „Das ist das wichtigste Ergebnis“, sagt Valencia. „Wir haben damit entdeckt, wie wir die chemische Bindung beeinflussen können, um den Ladungstransfer zu steuern.“

### Ferromagnetismus beobachtet, Supraleitung erhofft

Über diesen Mechanismus könnte man beeinflussen, wie sich neue Phasen an den Grenzflächen ausbilden, zum Beispiel der Ferromagnetismus, der in dem jetzigen Experiment beobachtet wurde. „Vielleicht können wir so auch eine unkonventionelle Supraleitung finden, die man in Analogie zu Kupraten auch in solchen Nickelat-Heterostrukturen vermutet“, berichtet Valencia. „Wir hoffen, dass diese Arbeit dazu beitragen wird, bessere Grenzflächen zu entwickeln, an denen neue aufregende Phasen der Materie gezielt erzeugt und untersucht werden können“, ergänzt Bibes. *arö*

Nature Physics, 12, 484-492 (DOI: 10.1038/nphys3627): Hybridization-controlled charge transfer and induced magnetism at correlated oxide interfaces; M. N. Grisolia, J. Varignon, G. Sanchez-Santolino, A. Arora, S. Valencia, M. Varela, R. Abrudan, E. Weschke, E. Schierle, J. E. Rault, J.-P. Rueff, A. Barthélémy, J. Santamaria and M. Bibes

## EIN ENZYM ALS KATALYSATOR FÜR KOHLENDIOXID

Ein Forscherteam der Humboldt-Universität zu Berlin (HUB) hat an BESSY II auf atomarer Ebene untersucht, wie ein **Enzym aus einem Mikroorganismus Kohlendioxid in Kohlenmonoxid** umwandelt. Die neuen Einblicke könnten den Bauplan für einen technischen Katalysator liefern.

Für einen Biochemiker wie Prof. Dr. Holger Dobbek von der HUB ist Kohlendioxid nichts anderes als ein klimaschädliches Abfallprodukt, das er gerne in einen wertvollen Rohstoff verwandeln würde. Zum Beispiel könnte man eines der beiden Sauerstoff-Atome aus dem Kohlendioxid entfernen und so Kohlenmonoxid herstellen. Das ist zwar für den Menschen giftig, enthält aber deutlich mehr Energie als Kohlendioxid. Es lässt sich auch relativ problemlos in Verbindungen wie Essigsäure umwandeln, aus der viele andere Kohlenstoffverbindungen hergestellt werden können, die sonst aus Erdöl produziert werden.



Kohlekraftwerke produzieren relativ viel Kohlendioxid. Forscher am HZB haben den ersten Schritt hin zu einem Katalysator gemacht, mit dem das klimaschädliche Gas in Kohlenmonoxid und Essigsäure umgewandelt werden könnte.

Mikroorganismen in heißen, Kohlenmonoxidhaltigen Quellen auf den nordöstlich von Japan gelegenen Inseln der Südlichen Kurilen könnten dabei helfen. Die Bakterien verwandeln das Kohlenmonoxid in Kohlendioxid und leben von der dabei frei werdenden Energie. Dabei hilft ihnen ein Enzym, in dessen Zentrum ein Nickel-, vier Eisen- und vier Schwefel-Atome sitzen. „Mit diesem Enzym können andere Bakterienarten umgekehrt auch Kohlendioxid in Kohlenmonoxid umwandeln“, berichtet Holger Dobbek. Das wiederum interessiert die chemische Industrie brennend, weil diese Umwandlung mit konventionellen technischen Katalysatoren bislang viel Energie benötigt: Ein Katalysator nach dem Vorbild der Bak-

terien könnte das mit deutlich geringerem Energieverbrauch. Um einen solchen Katalysator künstlich zu bauen, muss man aber zunächst einmal verstehen, wie das Enzym in den Bakterien genau funktioniert. Dabei gelang Holger Dobbek und seinen Mitarbeitern Jochen Fesseler und Jae-Hun Jeoung mit Hilfe der Beamline 14 am Synchrotronring BESSY II ein wichtiger Durchbruch.

### Zahlreiche Messungen an BESSY II

Um die Struktur des Enzyms im Röntgenlicht von BESSY II zu analysieren, muss es in kristalliner Form geordnet vorliegen. Die großen und komplexen Eiweißmoleküle, die das Enzym ausmachen, müssen also in einem regelmäßigen Kristallgitter angeordnet sein. Ein schwieriger Präparationsschritt, der den Forschern jedoch gelungen ist. Dabei setzten sie vor der Kristallisation unterschiedliche Mengen an  $\text{CO}_2$  zu, und ließen den Umwandlungsprozess in Gang kommen. Dann kühlten sie das Enzym mit flüssigem Stickstoff rasch ab, froren die beginnende Reaktion ein und züchteten daraus Kristalle. „In einer tollen Zusammenarbeit mit Manfred Weiss und seinen Mitarbeitern vom HZB untersuchten wir dort ungezählte Male unsere kristallisierten Enzyme“, erklärt Holger Dobbek. Am Ende sahen die Forscher jedes einzelne Atom im Zentrum des Enzyms gut aufgelöst. Das verblüffende Ergebnis dieser Mühen zeigt einen Schnappschuss, kurz bevor das Kohlendioxid ein Sauerstoff-Atom abgibt: Dabei sitzt das Kohlendioxid-Molekül mit dem Kohlenstoff-Atom sehr nahe an einem Nickel-Atom des Enzyms, während eines der beiden Sauerstoff-Atome sich dicht bei einem der Eisen-Atome befindet. Das eigentlich in seiner Form gerade Kohlendioxid biegt sich im Enzym kräftig und kann so das Sauerstoff-Atom in der Nähe des Eisen-Atoms abgeben. Mit dieser genauen Information steigen die Chancen, einen preiswerten Katalysator zu konstruieren, der das Abfallprodukt Kohlendioxid in die wertvollen Rohstoffe Kohlenmonoxid und Essigsäure umwandelt. *rk*

Angew. Chem. Int. Ed. 2015, 54, 8560–8564 (DOI: 10.1002/anie.201501778): How the  $[\text{NiFe}_4\text{S}_4]$  Cluster of CO Dehydrogenase Activates  $\text{CO}_2$  and NCO; J. Fesseler, J.-H. Jeoung and H. Dobbek

## BEEINDRUCKENDE BILDER AUS DER WISSENSCHAFT

IM NOVEMBER 2015 NAHMEN 47 HOBBYFOTOGRAFEN AM ZWEITEN HZB SCIENCE PHOTO WALK TEIL. IHRE BILDER WURDEN IN EINEM FOTOWETTBEWERB AUSGEZEICHNET.

Mit seinem Bild „Weltraum“ (rechts) war Holger Fehsenfeld im doppelten Sinne erfolgreich: Für die fünfköpfige Jury, in der Experten aus Kunst, Fotografie und Medien vertreten waren, war es das beste der fast 200 eingereichten Wettbewerbsbilder. Die 103 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des HZB, die ihre Stimme für den Publikumspreis abgaben, wählten es auf den dritten Platz.

Holger Fehsenfeld war einer der Fotografen, die im November 2015 Einblicke in eine Welt erhielten, die Laien ansonsten nur selten vor die Linse bekommen. Fast drei Stunden führten Mitarbeiter des HZB die Fotografen zu den verschiedenen Forschungsschauplätzen auf dem Campus in Adlershof.

Der Höhepunkt: BESSY II, ein Ort, an dem Spitzenforschung betrieben wird, der aber auch Raum für Kreativität bietet, wie die Gäste schnell feststellten. Ihre besten Bilder reichten die Teilnehmer beim Wettbewerb zum HZB Science Photo Walk ein. Die Jury wählte die besten 20 Motive aus und vergab drei Preise. Auf den zweiten Platz kam Isabel Wienold mit dem Foto „Spirale“, den dritten Platz Martin Brünger mit „Scientist at Work III“.



Die Mitarbeiter des HZB vergaben den ersten Platz an Hans Georg Conradis Werk „Einblick“ und den zweiten Platz an Doris Krocks Bild „The elephant“. Im Anschluss wurden die schönsten Motive in einer Vernissage bei BESSY II gezeigt.

## VON ANGEREGTEN ATOMEN ZUR FUNKTIONALITÄT

**PROF. DR. ALEXANDER FÖHLISCH** HAT EINEN ERC ADVANCED GRANT EINGEWORBEN.



Der European Research Council (ERC) fördert mit den Advanced Grants unkonventionelle und wegberreitende Forschung und unterstützt herausragende Spitzenforscher. Alexander Föhlisch ist Professor am Institut für Physik und Astronomie der Universität Potsdam und leitet am HZB das Institut für Methoden und Instrumentierung der Forschung mit Synchrotronstrahlung. Mit dem ERC Advanced Grant

erhält er für seine Arbeit an hochselektiven Nachweisverfahren mit Synchrotronlicht und Röntgenlasern insgesamt 2,5 Millionen Euro für fünf Jahre. Das neue Forschungsprojekt trägt den Namen „Excited state Dynamics from Anti-Stokes and non-linear resonant inelastic X-ray scattering“ (EDAX). Föhlisch wird darin untersuchen, wie sich chemische Reaktionspfade und Phasenübergangsverhalten mit neuartigen röntgenspektroskopischen Verfahren sichtbar machen lassen. Sie dienen als Grundlage für eine effiziente Energiewandlung und zukünftige energieeffiziente Informationstechnologien.

## NACHWUCHSGRUPPE FÜR SOLARE BRENNSTOFFE

**DR. KATHRIN AZIZ-LANGE** BAUT SEIT ANFANG 2016 EINE HELMHOLTZ-NACHWUCHSGRUPPE AUF.

Aus 250 internationalen Bewerbungen hat die Helmholtz-Gemeinschaft Ende 2015 insgesamt 17 Nachwuchswissenschaftler ausgewählt, die ihre eigenen Forschungsgruppen an Helmholtz-Zentren aufbauen können. „Wir freuen uns, dass Kathrin Aziz-Lange in dem strengen Auswahlverfahren die Jury von ihrem Forschungsvorhaben überzeugt hat, und dass sie nun am HZB die Forschung zu Solaren Brennstoffen verstärken wird“, sagt Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla, wissenschaftliche Geschäftsführerin des HZB.

Kathrin Aziz-Lange beschäftigt sich insbesondere mit der Rolle von Fehlstellen in der Struktur neuartiger Materialsysteme. Diese können sowohl zu gewünschten als auch zu unerwünschten Eigenschaften führen. Sie will die Entstehung von Fehlstellen in Katalysatoren und lichtabsorbierenden Materialien beobachten.



## FREIGEIST-FELLOWSHIPS FÜR HZB-WISSENSCHAFTLER

DIE FORSCHUNG VON **DR. ANNIKA BANDE** UND **DR. TRISTAN PETIT** AUS DEM TEAM VON **PROF. DR. EMAD AZIZ** WIRD VON DER VOLKSWAGENSTIFTUNG GEFÖRDERT.



Dr. Tristan Petit und Dr. Annika Bande werden mit Freigeist-Fellowships bei ihren Forschungsprojekten am HZB unterstützt.

Die Volkswagen Stiftung fördert mit den Freigeist-Fellowships exzellente Postdocs mit originellen Forschungsvorhaben, die über die Grenzen ihres eigenen Fachs hinausblicken. Für sein Projekt zu Nanodiamant-Materialien und Nanokohlenstoffen hat Dr. Tristan Petit im Sommer 2015 ein Freigeist-Fellowship erhalten. Die Förderung ist auf fünf Jahre ausgelegt und ermöglicht ihm den Aufbau eines eigenen Teams. Petit kam 2013 an das HZB ins Team von Emad Aziz. Bereits in seiner Doktorarbeit hatte er Oberflächenmodifikationen von Nanodiamanten untersucht, um ihr Potenzial für biomedizinische Anwendungen auszuloten. Seitdem hat er seine Forschungsinteressen verbreitert, denn Nanodiamant-Materialien können auch katalytische Wirkung entfalten, insbesondere unter Bestrahlung mit Sonnenlicht. Eine Vision ist es, synthetische Nanodiamant-Materialien zu entwickeln, um mit Sonnenlicht und Kohlendioxid solare Brennstoffe wie Methan zu produzieren und damit Solarenergie chemisch zu speichern.

Zuvor hatte bereits Dr. Annika Bande für ihre Forschung am Institut „Methoden der Materialentwicklung“ ein Freigeist-Fellowship erhalten. Die Wissenschaftlerin aus dem Bereich der Theoretischen Chemie beschäftigt sich mit ultraschnellen Energietransfer-Prozessen. Im Mittelpunkt ihrer Forschung steht der „interatomare Coulomb-Zerfall“ (ICD): Beim ICD wird in einem Atom zunächst ein elektronisch angeregter Zustand erzeugt. Bei der Rückkehr in den Grundzustand gibt das Atom überschüssige Energie durch elektronische Coulomb-Wechselwirkung an ein Nachbaratom oder -molekül ab. Dabei treten die Elektronen auch über lange Entfernungen miteinander in Wechselwirkung. Annika Bande hat in ihren Arbeiten gezeigt, dass ICD auch in halbleitenden Nanokristallen stattfinden muss. Den experimentellen Nachweis will sie mit ihrem Team am Institut von Aziz führen.

## DEUTSCHER SOLARPREIS FÜR MARTHA LUX-STEINER

DIE **EUROPÄISCHE VEREINIGUNG FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (EUROSOLAR)** WÜRDIGT DAMIT IHR LEBENSWERK.

Prof. Dr. Martha Lux-Steiner leitete bis März 2016 das Institut für Heterogene Materialsysteme am HZB und war Professorin am Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin. Im Laufe ihrer Karriere hat die renommierte



Wissenschaftlerin neue Materialsysteme für Solarzellen entwickelt, den Technologietransfer vorangetrieben und sich in der Lehre und für den wissenschaftlichen Nachwuchs engagiert, wie es in der Begründung für die Ehrung hieß. Dabei sei sie immer wieder neue Wege gegangen, nicht zuletzt auch mit einer Sommer-Universität in den Schweizer Bergen, wo sich junge Menschen aus Architektur, Betriebswirtschaft und Naturwissenschaft praktisch und theoretisch mit erneuerbaren Energien beschäftigen.

## WICHTIGE BERUFUNGEN

**Prof. Dr. Gerd Schneider** folgte dem Ruf auf eine W2-S-Professur „Röntgenmikroskopie“ am Institut für Physik der Humboldt-Universität zu Berlin im April 2015. Die Professur ist verbunden mit der Leitung der Arbeitsgruppe „Röntgenmikroskopie“ am HZB.

**Prof. Dr. Emad Aziz** ist im Juli 2015 zum Professor (W3) an der Freien Universität Berlin ernannt worden, zuvor hielt er eine Juniorprofessur am Fachbereich Physik. Aziz leitet das HZB-Institut für Methoden der Materialentwicklung und das Joint Lab JULiQ, das die Freie Universität Berlin und das HZB gemeinsam betreiben.

## FÜNF JAHRE HZB-SCHÜLERLABOR AUCH IN ADLERSHOF

SCHÜLERINNEN UND SCHÜLER FÜR NATURWISSENSCHAFTEN ZU BEGEISTERN – DAS LEISTET SEIT FÜNF JAHREN DAS **HZB-SCHÜLERLABOR** IN ADLERSHOF.



Im Oktober 2015 hat das Schülerlabor des HZB am Standort Adlershof sein fünfjähriges Bestehen gefeiert. Seit seiner Gründung kamen mehr als 5.500 Schülerinnen und Schüler zum Experimentieren in die Magnusstraße. Zum Jubiläum hatte das Schülerlabor Sechstklässler aus der Grünauer Grundschule eingeladen, um spannende Experimente durchzuführen. Nach einem Projekttag zum Thema Formgedächtnis-Materialien wurde natürlich auch gefeiert: mit einem Geburtstagsständchen und einer Torte für die Gäste und Mitarbeiter. Das Schülerlabor bietet zwei Projektstage pro Woche an, an denen die Schüler selbst experimentieren und Fragen auf den Grund gehen können. Themen sind Solarenergie, Licht und Farben sowie Materialforschung. Genau wie im Schülerlabor am Standort Wannsee haben sie einen klaren Bezug zur Forschung des HZB. Die Experimente und Aufgaben werden für verschiedene Klassenstufen – von der Grundschule bis zur Oberschule – altersgerecht aufbereitet. „Viele

Kinder und Jugendliche erleben im Schülerlabor Naturwissenschaften einmal von einer anderen Seite, sie haben Spaß beim Experimentieren und sind erstaunlich in ihre Arbeit vertieft“, sagt Dr. Ulrike Witte, Leiterin des HZB-Schülerlabors.

## AUSZEICHNUNGEN FÜR DIE FORSCHUNG AM HZB

2015 ERHIELTEN WIEDER ZAHLREICHE **WISSENSCHAFTLERINNEN UND WISSENSCHAFTLER PREISE** UND AUSZEICHNUNGEN FÜR IHRE HERVORRAGENDE FORSCHUNGSARBEIT.



**Frank Siewert** aus dem HZB-Institut für Nanometeroptik und Technologie ist mit dem internationalen „Giovanni Sostero Preis 2015“ ausgezeichnet worden. Damit würdigte das Preis-Komitee seine Beiträge zur Weiterentwicklung der optischen Messtechnik für Synchrotron-

optiken. In ihrer Begründung betonten die Juroren, Siewert habe mit seinen Arbeiten „die Grenzen der optischen Messtechnik auf ein beispiellos hohes Niveau gebracht und unterstütze konstruktiv mit seinen modernsten Messmethoden die gesamte internationale Metrologie-Community für Röntgenoptiken“.



Im Dezember 2015 vergab der Freundeskreis Helmholtz-Zentrum Berlin zum 25. Mal den Ernst-Eckhard-Koch-Preis für eine herausragende Promotionsarbeit auf dem Gebiet der Forschung mit Synchrotronstrahlung sowie den Innovationspreis Synchrotronstrahlung. **Dr. Robert Streubel** (im Bild re. mit Prof. Mathias Richter vom Freundeskreis Helmholtz-Zentrum Berlin) erhielt den Ernst-Eckhard-Koch-Preis für seine Pro-

motionsarbeit „Imaging Spin Textures on Curved Magnetic Surfaces“ an der TU Chemnitz ausgezeichnet. Darin untersuchte er aufgrund einer neuen Kombination von Röntgen-Absorptionstomographie und -Photoemissionsmikroskopie dreidimensionale magnetische Strukturen mit zirkular polarisierter Strahlung.

Den Innovationspreis Synchrotronstrahlung 2015 erhielt **Dr. Claudio Masciovecchio** vom Elettra-Synchrotrone in Trieste. Seine Arbeiten demonstrieren auf eindrucksvolle Weise die Möglichkeiten des weltweit ersten sogenannten SEED-Freie-Elektronen-Lasers für weiche Röntgenstrahlung FERMI.



**Dr. Steve Albrecht**, Post-Doc bei Prof. Dr. Bernd Rech, Leiter des HZB-Instituts für Siliziumphotovoltaik, wurde im Dezember 2015 als einer von vier Wissenschaftlern mit dem Carl-Ramsauer-Preis 2015 der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin ausgezeichnet. Im Rahmen eines Festkolloquiums stellte er seine Arbeit über die Generierung, Rekombination und Extraktion von Ladungen in Polymer-Fulleren-Mischsolarzellen vor.



**Wissenschaftlicher Beirat**  
Vorsitzende: Dr. U. Steigenberger

**Wissenschaftlich-Technischer Rat**  
Vorsitzende: Prof. Dr. S. Schorr

**Gesellschafterversammlung**  
(Bund und Land Berlin)

**Aufsichtsrat**  
(Vorsitzender: Dr. K. E. Huthmacher)

**Wissenschaftliche GF**  
Prof. Dr. A. Kaysser-Pyzalla

**Kaufmännische GF**  
Th. Frederking

**Betriebsrat**  
Vorsitzende: E. Lesner

**Geschäftsführung**  
Beratung Forschungsförderung GF-BF (Dr. F. Tonini) | Kommunikation GF-KOM (Dr. J. Helms) | Recht und Verträge GF-RV (C. Pursian) | Compliance Management GF-CM (C. Pursian)

**Erneuerbare Energie**  
Sprecher: Prof. Dr. B. Rech

**Silizium-Photovoltaik**  
(Prof. Dr. B. Rech) EE-IS

**Solare Brennstoffe**  
(Prof. Dr. R. van de Krol) EE-IF

**Kompetenz-Zentrum Photovoltaik Berlin**  
(Prof. Dr. R. Schlattmann) EE-IP

**Nanoskalige Strukturen und mikroskopische Analyse**  
(Dr. M. Wollgarten) EE-ANSM/A

**Grenzflächendesign**  
(Prof. Dr. M. Bär) EE-NI

**Nanooptische Konzepte für die PV**  
(Prof. Dr. M. Schmidt) EE-NOPT

**Nano-SIPPE**  
(Prof. Dr. C. Becker) EE-NSIP

**Operando Characterization of Solar Fuel Materials**  
(Prof. Dr. K. Aziz-Länge) EE-NOC

**Perowskit Tandemsolarzellen**  
(Dr. S. Albrecht) EE-NPET

**Molekulare Systeme**  
(Prof. Dr. N. Koch) EE-GMS

**Energie Materialien**  
Sprecherin: Prof. Dr. S. Schorr

**Weiche Materie und Funktionale Materialien**  
(Prof. Dr. M. Ballauff) EM-ISFM

**Angewandte Materialforschung**  
(Prof. Dr. J. Banhart) EM-IAM

**Institut für Nanospektroskopie**  
(Prof. Dr. S. Raoux) EM-ISPEK

**Methoden der Materialentwicklung**  
(Prof. Dr. F.F. Aziz) EM-IMM

**Funktionale Oxide für die energieeffiziente IT**  
(Dr. C. Dubourdieu) EM-IFOX

**Struktur und Dynamik von Energiematerialien**  
(Prof. Dr. S. Schorr) EM-ASD

**Methoden zur Charakterisierung von Transportphänomenen in Energiematerialien**  
(Dr. K. Häbicht) EM-AMCT

**Quantenphänomene in neuen Materialien**  
(Prof. Dr. B. Lake) EM-ACM

**Materialien für grüne Spintronik**  
(Prof. Dr. O. Rader) EM-AMGS

**Mikrostruktur- und Eigenspannungsanalyse**  
(Prof. Dr. Ch. Genzel) EM-AME

**Energiekatalyse**  
(Prof. R. Schlögl) EM-GKAT

**Berlin Joint Lab für Quantenmagnetismus**  
(Prof. Dr. J. Reuther) EM-NOUAM

**Bielefeld-Berlin Joint Lab (BiBer)**  
Joint Lab für Makromolekulare Kristallographie (JointMXLab)

**Joint Lab für Ultrasmalle Dynamik in Lösungen und an Grenzflächen (JULi)**  
Joint Lab für Strukturforchung (JLSR)

**Heilmholtz Energy Materials Characterisation Plattform (HEMCP)**  
(Prof. Dr. R. Schlattmann) NEAT (Dr. M. Russina)

**Forschung an Großgeräten**  
Sprecher: Prof. Dr. A. Föhlich

**Methoden und Instrumentierung der Forschung mit Synchrotronstrahlung**  
(Prof. Dr. A. Föhlich) FG-ISRR

**Beschleunigerphysik**  
(Prof. Dr. A. Jankowiak) FG-IA

**SRF - Wissenschaft und Technologie**  
(Prof. Dr. J. Knobloch) FG-ISRF

**Nanometropik und Technologie**  
(Prof. Dr. A. Erko\*) FG-INT

**Undulatoren**  
(Dr. J. Bahrdt) FG-AUND

**ERL-Design Simulationen**  
(Prof. A. Matveenko) FG-NSIMU

**Neutronentomographie**  
(Prof. Dr. W. Treimer) FG-GTOMO

**Ultrasmalle Dynamik**  
(Prof. Dr. M. Bargheer) FG-GUD

**Uppsala-Berlin Joint Lab (UJBL)**

**Joint Lab Beschleunigerphysik (JLAP)**

**Heilmholtz Energy Materials Foundry (HEMF)**  
(Prof. Dr. R. van de Krol)

**Nutzerplattform**  
Sprecher: Prof. Dr. A. Jankowiak

**Nutzerkoordination**  
(Dr. A. Vollmer\*) NP-ACO

**Betrieb Reaktor BER II**  
(Dr. H. Koch) NP-ABR

**Betrieb Beschleuniger BESSY II**  
(Prof. Dr. A. Jankowiak) NP-ABS

**Betrieb MLS**  
(K. Bürkmann-Gehle) S-MLS

**Protonentherapie**  
(Dr. A. Denker) S-PT

**Präzisionsgitter**  
(Dr. M. Löger) S-PG

**Hochfeldmagnet**  
(Prof. Dr. B. Lake\*) NP-AHEM

**Experimentnahe Technik 1**  
(Dr. A. Rupp) NP-HI

**Technische Nutzerunterstützung BER II**  
(Dr. A. Rupp) NP-AUN

**Probenumgebung**  
(Dr. K. Kießer) NP-ASE

**Verfahrensmanagement Stilllegung BER II**  
(Dr. A. Rupp) NP-APMD

**Experimentnahe Technik 2**  
(Dr. C. Jung) NP-HII

**Technische Nutzerunterstützung BESSY II**  
(Dr. C. Jung) NP-AUP

**Konstruktion**  
(L. Drescher) NP-ATD

**Fertigung**  
(K. Hietz) NP-AMAN

**Administration**  
(U. Ewald) A

**Personal und Soziales**  
(M. Bade) A-PS

**Finanz- und Rechnungswesen**  
(J. Neumann) A-FR

**Einkauf und Materialwirtschaft**  
(D. Höcker) A-EM

**Facility Management**  
(N.N.) FM

**Planen und Bauen**  
(F. Uschkoreit) FM-B

**Gebäude- und Anlagentechnik**  
(U. Grabe) FM-T

**Innere Dienste**  
(M. Naddok) FM-I

**Chemikalien und Sonderabfälle**  
(J. Beckmann) FM-C

**Zentralstelle für radioaktive Abfälle des Landes Berlin**  
(J. Beckmann) S-ZRA

**Objektsicherung**  
(F. Delßenbeck) FM-O

**Informationstechnik**  
A. Finke IT

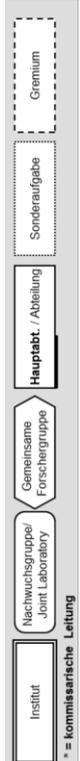
**Frontoffice und Helpdesk**  
(S. Vogt) IT-FH

**Dienste und Software**  
(L. Heinzel) IT-DS

**Experimentsteuerung u. Datenerfassung**  
(O.-P. Sauer) IT-ED

**Infrastruktur**  
(Dr. D. Herrendörfer) IT-IS

**Bbeauftragte Personen für Sicherheit und Strahlenschutz**  
(Th. Frederking)



\* = Kommissionäre Leitung

## Lageplan

Am HZB-Standort Wannsee befindet sich der Lise-Meitner-Campus mit der Forschungsneutronenquelle BER II, am HZB-Standort Adlershof der Wilhelm-Conrad-Röntgen-Campus mit dem Elektronenspeicherring BESSY II.



## Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

### IMPRESSUM

**HZB-Highlight-Bericht 2015** des Helmholtz-Zentrums Berlin für Materialien und Energie GmbH. Nachdruck nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Herausgebers.  
Redaktionsschluss: Juli 2016

#### Herausgeber:

Helmholtz-Zentrum Berlin, Hahn-Meitner-Platz 1, 14109 Berlin, Telefon: (030) 80 62-420 34

#### Redaktion:

Dr. Ina Helms (ih, verantwortlich), Hannes Schlender (hs, Gesamtkoordination), Antonia Rötger (arö), Silvia Zerbe (sz)  
E-Mail: ina.helms@helmholtz-berlin.de, Anschrift wie Herausgeber

#### Verlagsbetreuung:

n.k mediaconcept GbR, Obere Lagerstraße 38b, 82178 Puchheim bei München, Telefon: (089) 80 90 83 33  
Geschäftsführer: Klaus Dieter Krön, Christoph Neuschäffer

#### Konzept und Realisierung:

Christoph Neuschäffer (cn), Telefon: (089) 20 20 68 66

**Mitarbeiter:** Ralf Butscher (rb), Volker Eidems (ve), Roland Knauer (rk), Torsten Mertz (tm)

**Übersetzung und Lektorat:** Peter Gregg, Gill Elaine Schneider

**Gestaltung und Layout:** Klaus Dieter Krön

**Bildredaktion:** Christoph Neuschäffer

**Bildbearbeitung:** Lothar Trutter

**Andruck:** Trumedia GmbH, Tattenbachstraße 19, 86179 Augsburg

#### Druck:

Elbe Druckerei Wittenberg GmbH, Breitscheidstraße 17a, 06886 Lutherstadt Wittenberg  
Telefon: 03491 41 02 42, Telefax: 03491 41 02 40  
E-Mail: info@elbedruckerei.de, www.elbedruckerei.de

**Fotonachweis:** Alle Fotorechte beim HZB, außer: Titel HZB/Michael Setzpfandt, S. 2/3 HZB/Michael Fernahl, S. 7 HZB/Phil Dera, S. 8 HZB/C. Alonso Piney, S. 10 Thomas Splettstößer, S. 11 HZB/Florian Kronast, S. 12 HZB/Christoph Merschjann, S. 13 HZB/Guanchao Yin, S. 14 Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, S. 15 HZB/Sebastian Fiechter, TTTNIS, S. 17 HZB/David Starr, S. 20 HZB/Michael Setzpfandt, S. 21/22 MPI für die Physik des Lichts, S. 23 HZB/Steve Albrecht, S. 24 HZB/Phil Dera, VELUX Deutschland GmbH, S. 25 Syda Productions/fotolia, S. 26 HZB/Matthias May, S. 28 HZB/Volker Mai, S. 29 euroluftbild.de/Robert Grahn, S. 30 HZB/Dorothea Alber, S. 31 HZB/Marlen Paepflow, S. 34 Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, S. 35 HZB/Karsten Hollmack, S. 36 HZB/Michael Fernahl, S. 37 HZB/Silvia Zerbe, S. 38 HZB/Julia Köszegi, S. 39 HZB/Heike Cords, S. 40 HZB/C. Alonso Piney, S. 41 HZB/Ingo Kniest, S. 45 dmitrimaruta/fotolia, Max-Planck-Institut für Festkörperforschung/Ohmer, S. 46 Elsevier B.V., S. 47 vencav/fotolia, S. 48 Mihajlo Maricic/thinkstock, S. 49 Ludwig-Maximilians-Universität München/Dina Fattakhova-Rohlfing, S. 51 Thomas Splettstößer, S. 52 Christoph Hagen/Kyle C. Dent/Tzviya Zeev-Ben-Mordehai/Michael Grange/Jens B. Bosse, S. 53 Manuel Bibes, S. 54 Dr.G.Schmitz, S. 55 HZB/Holger Fehsenfeld, HZB/A. Rouvière, HZB/Andreas Kubatzki, S. 56 Volkswagen-Stiftung/Mirko Krenzler, www.rolandhorn.de/mail@rolandhorn.de, S. 57 HZB/Andreas Kubatzki, HZB/Phil Dera (2), htgrahn

## Kontakt

### Lise-Meitner-Campus

Hahn-Meitner-Platz 1  
14109 Berlin  
Tel.: +49 (0)30 8062 - 0  
Fax: +49 (0)30 8062 - 42181  
wannsee@helmholtz-berlin.de

### Wilhelm-Conrad-Röntgen-Campus

Albert-Einstein-Str. 15  
12489 Berlin  
Tel.: +49 (0)30 8062 - 0  
Fax: +49 (0)30 8062 - 12990  
adlershof@helmholtz-berlin.de

### Institut für Silizium Photovoltaik

Kekuléstr. 5  
12489 Berlin  
Tel.: +49 (0)30 8062 - 0  
Fax: +49 (0)30 8062 - 41333  
E-IS-office@helmholtz-berlin.de

### PVcomB

Schwarzschildstr. 3  
12489 Berlin  
Tel.: +49 (0)30 8062 - 0  
Fax: +49 (0)30 8062 - 15677  
info@pvcomb.de