

ENERGIE BÜNDELN VISIONEN REALISIEREN



HIGHLIGHTS 2012

Leistungsbericht mit Höhepunkten aus der Forschung am
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie





INHALT

Vorwort	04	Kooperationen	38
Interview: Die Zukunft der Energieforschung am HZB	06	Augentumor-Therapie: Langfristige Perspektive	39
Upgrade-Arbeiten an BESSY II	08	Sonnenlicht zu Wasserstoff	40
		PVcomB: Vollbetrieb auf kleinen Modulen	41
		Zwei neue Virtuelle Institute	42
		Neues Labor für Flüssigkeiten eröffnet	42
Highlights aus den Nutzerexperimenten	10	Zukunftsprojekte	44
Ein Katalysator mit zwei Gesichtern	12	Vier Messplätze für EMIL	44
Wie Salz im Regenwald zu Wolken wird	13	BERLinPro: Durchbruch beim Photoinjektor	44
Wasserstoff-Tanks für die Hosentasche	14	Rekord-Magnet für die Neutronenforschung	45
Mit Salzen Daten speichern	16		
Die Achillesferse des Malaria-Erregers	18	Vermischtes	46
Katalysatoren: Mehr Leistung durch Defekte	19	Zwei neue Institute am HZB	46
Fehlersuche im Zellbaukasten	20	Preise und Auszeichnungen	47
		Zwei neue Nachwuchsgruppen am HZB	48
		Science Photo Walk und Berufungen	49
Highlights aus der eigenen Forschung	22	Anhang	50
Magnet-Ventil im Sandwich-Stil	24	Organigramm des HZB	50
Topologische Isolatoren im Visier	26	Lageplan, Impressum	51
Fortschritte bei Bauelementen aus Graphen	28		
Schleichende Materialermüdung modelliert	30		
Verräterische Asymmetrie	31		
Gitterdynamik im Röntgenblick	32		
Im Labyrinth der magnetischen Domänen	33		
Maßgeschneiderte organische Halbleiter	34		
Wasser als Türöffner	35		
Polyzucker macht Gelenke stabiler	36		
Turbo für Solarzellen	37		

DAS HZB VOR DER NEUEN FÖRDERPERIODE – SCHWERPUNKT ENERGIEFORSCHUNG

Auch wenn man jeden Tag mit den Großgeräten zu tun hat, man verliert nicht den Respekt vor ihnen“, sagt Dr. Silke Christiansen im aktuellen Imagefilm zur Energieforschung am HZB. Seit Jahresbeginn ist sie Leiterin des neuen Instituts „Nanoarchitekturen für die Energiewandlung“. Den Respekt vor dem scheinbar unentwirrbaren Labyrinth aus Leitungen, Kabeln und Verbindungen, das die zahlreichen Messplätze und Experimentierstationen an der Neutronenquelle BER II und dem Elektronenspeicherring BESSY II umgibt, teilt sie mit den meisten Besuchern unseres Zentrums. Dahinter verborgen sich jedoch hervorragende, teilweise weltweit einzigartige Instrumente und Experimentiereinrichtungen. 2012 haben knapp 3000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland diese Instrumente für ihre Forschungen genutzt.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des HZB, die neben ihrer eigenen Forschung die Experimentiereinrichtungen betreuen und stetig weiterentwickeln, bereiten sich derzeit auf die anstehende Begutachtung vor. Im Rahmen der programmorientierten Förderpolitik der Helmholtz-Gemeinschaft findet diese Anfang 2014 statt. Dabei wollen wir die Gutachter nicht nur von der Qualität der Großgeräte, der verfügbaren Messplätze und dem hohen Niveau unseres Nutzerservice überzeugen, sondern auch davon, dass es sich lohnt in zukünftige große Projekte an BESSY II und in der Energieforschung zu investieren.

Vor allem in das Projekt BESSY^{VS}R (Variabler Pulslängen-Speicherring). Mit dem unter diesem Namen geplanten Upgrade von BESSY II sollen die Nutzerinnen und Nutzer künftig an jeder einzelnen Beamline und für jedes Experiment die benötigte Pulslänge des Photonenstrahls frei bestimmen können. Entweder nutzen sie dann die gewohnt hohe Brillanz eines Speicherringes der dritten Generation, oder sie wechseln zu einer hohen Repetitionsrate mit Pikosekunden kurzen Lichtpulsen. Vorteile bringt dies vor allem für die Untersuchung von dynamischen Prozessen. Forscherinnen und Forscher könnten zum Beispiel statische Eigen-



Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla und Thomas Frederking

schaften ihrer Proben mit hoher Strahlintensität untersuchen und anschließend mit kurzen Lichtpulsen ergänzende Informationen über zeitaufgelöste Vorgänge in der Probe erhalten. Eine solche Variabilität wäre weltweit einzigartig. Im internationalen Spektrum der verfügbaren Photonenquellen wäre sie eine ideale Ergänzung zum Konzept eines Freie Elektronen Lasers, der kürzeste Pulse liefert und beugungsbegrenzten Speicherringen, deren Licht über eine maximale Brillanz verfügt (Lesen Sie dazu S. 8/9).

Deutlich sichtbar schreitet auch das EMIL-Projekt (Energy Materials In-Situ Laboratory) voran. In wenigen Wochen werden die Bagger anrücken, und man wird sehen, was direkt am BESSY-Speicherring entsteht: eine weltweit einzigartige Laboranlage für die Energieforschung. Hier sollen in Zukunft mit Röntgenanalytik Materialien und Prozesse für die Photovoltaik sowie durch Gruppen aus der Max-Planck-Gesellschaft Materialien und Mechanismen in photokatalytischen Umwandlungen untersucht werden. Nach Fertigstellung des Anbaus an BESSY II wird man – wie nirgendwo sonst auf der Welt – die Materialherstellung und die ultrapräzise Analyse von Schichteigenschaften miteinander verbinden können. Die in-situ Präparation erlaubt es, Materialien, Strukturen und Bauteile zwischen einzelnen Präparationsschritten zu untersuchen. Die Ultrahoch- oder Hochvakuumbedingungen muss man dabei nicht unterbrechen. Zugleich werden die Nutzer eine Synchrotronstrahlung zur Verfügung haben, die sich durch einen sehr breiten Energiebereich auszeichnet. Damit wird man Unter-

suchungen zur Stromerzeugung, Energiekonversion und Energiespeicherung kombinieren können.

Mit dem Aufbau des EMIL-Labors wird auch nach außen sichtbar, was sich im Inneren des HZB schon länger vollzieht: die stärkere Schwerpunktsetzung auf Forschungen zur Energieversorgung der Zukunft. Mit unserer Dünnschicht-Technologie im Bereich Photovoltaik gehören wir jetzt schon zu den führenden Standorten in Europa. Diese Expertise wollen wir in Zukunft auf eine noch breitere Basis stellen. Die brennendste Frage der kommenden Jahre wird dabei sein, wie man den durch Photovoltaik gewonnenen Strom in speicherbare Energieträger umwandeln kann. Wir freuen uns deshalb, im vergangenen Jahr neben Prof. Silke Christiansen auch Prof. Dr. Roel van de Krol als Leiter für das neue Institut „Solare Brennstoffe“ gewonnen zu haben. (mehr dazu auf Seite 46).

Bei der Lösung vieler wissenschaftlicher Fragestellungen kooperieren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des HZB erfolgreich mit den Kolleginnen und Kollegen an den Universitäten, den Partnereinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft und anderen außeruniversitären Einrichtungen weltweit. Zur wissenschaftlichen Kooperation mit den Universitäten hat das HZB, neben gemeinsamen Forschergruppen, das Instrument der Joint Labs etabliert, die idealerweise von einer gemeinsam berufenen Juniorprofessorin oder einem Juniorprofessor geleitet werden. Im Jahr 2012 konnten wir mit der Freien Universität Berlin ein solches gemeinsames Labor zum Thema „Untersuchung von Flüssigkeiten und funktionalen Materialien in Lösung“ eröffnen.

Gleich mit einer Vielzahl an Partnern kooperieren wir in den beiden neuen Virtuellen Instituten, die 2012 an den Start gingen. Die auf Seite 42 vorgestellten Beispiele zeigen anschaulich, warum es für das HZB so wichtig ist, sich mit Universitäten und anderen Partnern zu vernetzen. Denn nur durch die Zusammenarbeit gelingt es, Kompetenzen zu bündeln und wissenschaftliche Fragestellungen auf einer

breiteren Grundlage zu beantworten. Durch gemeinsame Berufungen können die leitenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des HZB ihre Forschungsergebnisse in die universitäre Lehre einbringen und Studierende für die Wissenschaft am HZB begeistern. Die Universitäten ermöglichen den Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern, Lehrerfahrung zu sammeln und sich damit weiter zu qualifizieren.

Eine Reihe von gemeinsamen Berufungen auf wichtige Lehrstühle der Hochschulen hat das HZB 2012 realisiert. Prof. Dr. Rutger Schlatmann, Leiter des PVcomB, wurde auf die Professur „Solarzellen-Technologie“ an der Hochschule für Technik und Wirtschaft berufen. Es ist die erste gemeinsame Berufung des HZB mit dieser Hochschule. Prof. Dr. Bella Lake, Leiterin der Abteilung „Quantenphänomene in neuen Materialien“ wurde an die Technische Universität Berlin berufen und Prof. Dr. Klaus Lips nahm den Ruf auf die Professur „Analytik für die Photovoltaik“ der Freien Universität Berlin an. Prof. Alan Tennant erhielt eine große Auszeichnung: Die Europäische Physikalische Gesellschaft verlieh ihm und fünf internationalen Kollegen für den Nachweis magnetischer Monopole den renommierten Europhysics Prize.

Für die hohe Qualität der Forschung am HZB und die Exzellenz der Nutzerschaft unserer Großgeräte sprechen die zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen, die die Nutzerinnen und Nutzer von BESSY II sowie BER II und die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des HZB veröffentlicht haben. Im Kanon der Forschungsgebiete des Zentrums ergänzen sich Photovoltaik, Solar Fuels und Wasserstoffspeichermaterialien einerseits, Magnetismus, magnetische Dynamik und leistungsfähige Datenspeicher andererseits. Sehr erfolgreich sind aber auch die Forschung an einer neuen Materialklasse, den topologischen Isolatoren, oder die Experimente an organischen Halbleitern. Diese und eine Auswahl an weiteren gesellschaftlich und wissenschaftlich relevanten Ergebnissen der Forschung am HZB möchten wir Ihnen in dem vorliegenden HZB-Highlight-Bericht 2012 vorstellen.


Prof. Dr. A. Kaysser-Pyzalla


Thomas Frederking

„WIR WOLLEN AN DIE HOCH HÄNGENDEN FRÜCHTE RAN“

Wie sich die Menschheit in Zukunft mit Energie versorgt, ist das zentrale Thema unserer Zeit. Der Forschungsbedarf ist gewaltig, um das Wirtschaftssystem auf regenerative Energien umzustellen. Mit dem Schwerpunktthema „Energieforschung“ bewegt sich das Helmholtz-Zentrum Berlin im Zentrum der politischen Diskussion. Ein Gespräch mit **Prof. Dr. Bernd Rech** zu den Auswirkungen der Energiewende auf Strategie, Forschungs Kooperationen und Laboralltag.

Herr Rech, Sie leiten seit sieben Jahren das Institut für Silizium-Photovoltaik am HZB und sind Bereichssprecher für die Solarenergieforschung. Wie hat sich das Umfeld in dieser Zeit verändert?

Ich habe die Institutsleitung während des Solarenergiebooms übernommen. Die Firmen aus der Photovoltaikbranche wuchsen und waren an einer Zusammenarbeit mit dem HZB sehr interessiert. Gemeinsame Projekte der Grundlagenforschung mit dem Ziel, neue Produkte entwickeln zu können, standen dabei im Mittelpunkt. Das hat zu spannenden Kooperationen geführt – und zur Gründung des PVcomB, dem Kompetenzzentrum Dünnschicht- und Nanotechnologie Berlin. Mittlerweile ist die Situation komplexer: Einerseits hat die Bundesregierung die Energiewende beschlossen – damit ist der Grundstein für den langfristigen Umstieg auf regenerative Energien gelegt. Andererseits steckt die Solarbranche in der Krise. Einige wichtige Firmen, die mit uns zusammenarbeiten, haben überlebt. Das kann zumindest ein Hinweis darauf sein, dass unsere Forschung einen Beitrag zur Innovationskraft dieser Unternehmen geleistet hat.

Wie muss die Solarenergieforschung des HZB auf diese Krise reagieren?

Kurzfristig können wir kaum helfen. Wir machen langfristige Grundlagenforschung – natürlich immer mit Blick auf die Anwendung. Die Photovoltaik steckt letztlich noch in den Kinderschuhen. Vergleichen Sie das mal mit der Wärme-Kraft-Maschine: Die wurde vor dreihundert Jahren erfunden, im 19. Jahrhundert hat sie die Industrialisierung möglich gemacht, heute ist sie in hochmoderner Form ein Eckpfeiler unseres Wirtschaftens. Wir stehen also mit der Photovoltaik gerade am Anfang einer Entwicklung, die voraussichtlich Jahrhunderte dauern wird. Deshalb darf sich die Forschung nicht durch kurzfristige Schwankungen



Prof. Dr. Bernd Rech, Leiter des Instituts für Silizium-Photovoltaik am HZB und Bereichssprecher für die Solarenergieforschung.

in Absatzmärkten oder durch die Vergabe öffentlicher Fördermittel vom Kurs abbringen lassen. Und der besteht darin, Photovoltaik effizienter und billiger zu machen und am besten auch noch speicherbar.

Was heißt das konkret?

Die gängige Photovoltaik-Anlage auf dem Hausdach hat einen Wirkungsgrad von 15 Prozent. Die Physik sagt uns aber, dass bis zu 80 Prozent möglich sind. Solarenergie effizient zu speichern, indem man sie beispielsweise direkt zur Produktion von Wasserstoff aus Wasser nutzt, ist zudem immer noch eine Herausforderung. Da kommen wir mit den klassischen Labormethoden nicht richtig voran – wir brauchen ganz andere Instrumente, mit denen wir viel tiefer in die Materie eindringen können. Mit solchen Instrumenten müssen wir die Gesetzmäßigkeiten auf atomarer Ebene analysieren und für die Anwendung nutzbar machen.

Da kommt das neue Projekt Energy Materials In-situ Laboratory Berlin, kurz EMIL, ins Spiel...

Genau. EMIL erschließt das Elektronensynchrotron BESSY II für die Energieforschung ganz neu. Mit modernen Labor-Methoden können heutige Photovoltaik-Technologien zwar weiter verbessert und leistungsfähiger gemacht werden. Aber die tief hängenden Früchte sind gepflückt. Jetzt müssen wir an die hoch hängenden ran, an die, die wir noch gar nicht richtig sehen können. Mit EMIL kann uns der Vorstoß ins Unbekannte gelingen. Mit dem geplanten Laborkomplex wollen wir den Aufbau von Solarzellen auf atomarer Ebene analysieren und neue Konzepte für die Solarenergieforschung entwickeln. Und mit „wir“ meine ich nicht nur die HZB-Forscher, sondern Solarenergieforscher aus der ganzen Welt.

Was bedeutet das für die Arbeit der HZB-Forscher?

EMIL wird eine zentrale Säule unserer zukünftigen Forschung. Das ist eine große Investition, die wir mit Leben füllen dürfen. Wie gesagt: Wir werden neue Forschungsansätze entwickeln, und ich gehe davon aus, dass die HZB-Institute neue Themen bearbeiten und neue Türen öffnen werden. Ich bin gespannt und verspreche mir viel von dem frischen Wind und den Ideen, die unsere HZB-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bestimmt einbringen werden. Letztlich ist das auch nicht so schwierig: Solarenergieforschung ist immer Materialforschung. Wir müssen die elektrischen, optischen, strukturellen und funktionalen Eigen-



Mit dem Infrastrukturprojekt EMIL werden am Elektronensynchrotron BESSY II beste Voraussetzungen für die Forschung an Energiematerialien geschaffen, betont Bernd Rech. Das neue Labor soll 2015 betriebsbereit sein.



Die Energieversorgung ist von hoher wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Bedeutung in den Industrienationen - und ein spannendes Feld für die Forschung.

schaften der Materialien verstehen, die für die Nutzung in der Solarenergie vielversprechend sind. Wir müssen Nanotechnologiekonzepte entwickeln, um Ideen für neue Bauelemente in der Photovoltaik und für die Speicherung von Solarenergie zu bekommen. Das sind alles Themen, die im HZB bereits heute etabliert sind - und die wichtige Impulse für die Solarenergieforschung geben können.

Ist das nicht ein wenig zu anspruchsvoll?

Nein. Die Energieversorgung wird definitiv eines der großen Themen sein und wird die Menschheit in den kommenden Jahrzehnten stark beschäftigen und fordern: Lösungen sind notwendig um unsere Zukunft auf diesem Planeten zu sichern. Das HZB besetzt hier ein bedeutendes Feld und die Erwartung der Gesellschaft ist hoch. Positiv ist, dass wir uns auf viele Jahre hinaus über spannende Forschungsprojekte freuen können.

Das Gespräch führte Hannes Schlender

ZUSAMMENGEFASST

- Die Energiewende ist zwar beschlossen, dennoch kämpfen Firmen der Solarbranche ums Überleben.
- Das HZB macht Grundlagenforschung, die langfristig die technischen Grundlagen der Solarenergiegewinnung verbessern wird.
- Ziel der Energieforschung am HZB ist es, Photovoltaik effizienter, billiger und speicherbar zu machen.
- Mit dem Projekt EMIL werden modernste Labor-Methoden für die Forschung an Materialien für die Herstellung von Solarzellen erschlossen.

BESSER FORSCHEN AN BESSY II

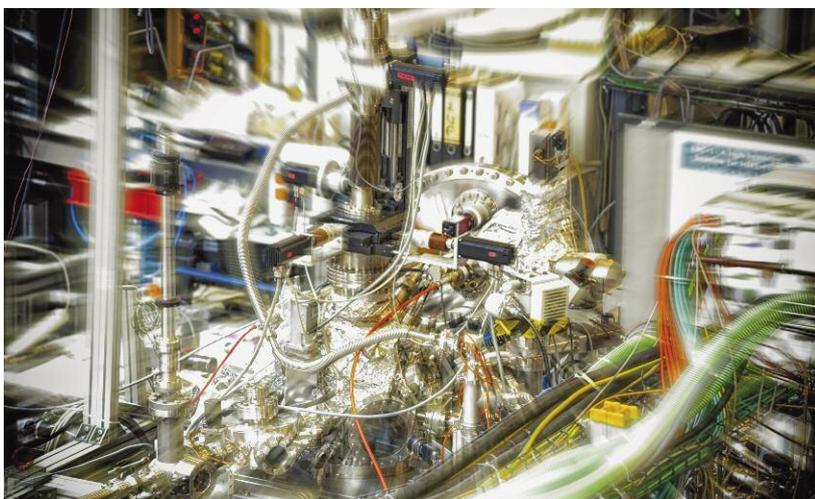
Wichtige Upgrade-Projekte wie der neue Vorbeschleuniger vom Typ LINAC, eine verbesserte Strahlführung sowie der sogenannte Top-Up-Modus machen den **Elektronenspeicherring** des HZB fit für die Zukunft.

Vor fast 15 Jahren ging er als eine der ersten Synchrotronquellen der dritten Generation in Betrieb: der Elektronenspeicherring BESSY II in Adlershof. Die Fragestellungen der wissenschaftlichen Nutzer haben sich seither gewandelt – und damit ihre Anforderungen an die Eigenschaften des Photonenstrahls. Die Herausforderung ist es, die Anlage stets so weiterzuentwickeln, dass sie attraktiv für Nutzer bleibt. Die nun abgeschlossenen Upgrade-Projekte sind allerdings mehr als nur eine stetige Verbesserung, denn die dadurch erreichten Strahleigen-

ten Top-Up-Modus (siehe Kasten) zu betreiben. Dieser läuft seit Herbst 2012 und sichert den Nutzern seitdem eine nahezu konstante Intensität an Photonen. „Durch den Top-Up-Modus ist es sehr viel einfacher, die ganze Maschine im thermischen Gleichgewicht zu halten“, erklärt Jankowiak. Denn da der Strahl mikrometergenau geführt werden muss, machen sich schon kleinste thermische Ausdehnungen bemerkbar.

Zusätzlich wird der Elektronenstrahl durch ein „Fast-Orbit-Feedback“-System (FOFB) nun 150-mal in der Sekunde

nachjustiert, so dass die Nutzer nun im Zusammenspiel beider Systeme von einem extrem stabilen und präzisen Photonenstrahl profitieren. Ohne die Arbeit von Dr. Peter Kuske hätte Top-Up an BESSY nicht umgesetzt werden können, betont Jankowiak, trotzdem sei so eine große Unternehmung immer Teamwork: Auch die Experten aus der Beschleunigergruppe, der Undulator-Abteilung, dem Strahlenschutz und der Infrastruktur haben entscheidende Beiträge geleistet.



Mehr als 2.000 Wissenschaftler nutzen jedes Jahr die Messplätze mit ihrer aufwändigen Instrumentierung am Elektronenspeicherring BESSY II in Berlin-Adlershof.

schaften sind ein enormer Fortschritt. Davon profitieren nun mehr als 2.000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die jedes Jahr an der Anlage forschen. „Was wir mit dem Upgrade von BESSY II geleistet haben, war eine Operation am offenen Herzen“, sagt Prof. Dr. Andreas Jankowiak. Bei laufendem Betrieb und nur minimalem Verlust an Strahlzeit für die Nutzer haben die Beschleunigerexperten in den vergangenen zwei Jahren den neuen LINAC-Beschleuniger installiert und zahlreiche Komponenten ausgetauscht, um das Großgerät im sogenann-

ten Top-Up-Modus (siehe Kasten) zu betreiben. Dieser läuft seit Herbst 2012 und sichert den Nutzern seitdem eine nahezu konstante Intensität an Photonen. „Durch den Top-Up-Modus ist es sehr viel einfacher, die ganze Maschine im thermischen Gleichgewicht zu halten“, erklärt Jankowiak. Denn da der Strahl mikrometergenau geführt werden muss, machen sich schon kleinste thermische Ausdehnungen bemerkbar.

Die Idee ist nun, an BESSY II variable Pulslängen anzubieten. Das ist ein völlig neues Konzept, das den Namen BESSY^{VS}R (Variabler Pulslängen-Speicherring) trägt. Im Kern

Ausblick: BESSY^{VS}R

Damit Großgeräte über mehrere Jahrzehnte an der Spitze bleiben, müssen sie konzeptionell weiterentwickelt werden. Bereits jetzt hat BESSY II einen entscheidenden Vorteil: Die Anlage ist so konzipiert, dass sie auch in einem Modus erfahren werden kann,

der deutlich kürzere Pulse liefert. Forscher brauchen diese, um zum Beispiel dynamische Prozesse in Proben zu beobachten. Doch zurzeit steht Forschern an BESSY II entweder ein hoher Photonenfluss zur Verfügung oder sie arbeiten mit kurzen Pulsen. Letztere werden bisher nur an wenigen Tagen im Jahr erzeugt.

Die Idee ist nun, an BESSY II variable Pulslängen anzubieten. Das ist ein völlig neues Konzept, das den Namen BESSY^{VS}R (Variabler Pulslängen-Speicherring) trägt. Im Kern



Im Rahmen des Upgrade an BESSY II wurde auch diese Anlage für die hochstabile Magnetstromversorgung des BESSY-II-Speicherrings aufgebaut.

geht es darum, dass Nutzer an jeder einzelnen Beamline und für jedes Experiment die Pulslänge frei wählen können. So könnten sie zum Beispiel eine Probe zunächst mit hoher Intensität durchleuchten und anschließend mit kurzen Pulsen komplementäre Informationen über zeitaufgelöste Vorgänge in der Probe bekommen. „Die Variabilität, die wir für BESSY^{VS}R anstreben, wäre weltweit einzigartig“, sagt Prof. Dr. Alexander Föhlisch, Leiter des Instituts „Methoden und Instrumentierung der Forschung mit Synchrotronstrahlung“. Während andere Konzepte zum Beispiel die Erhöhung der Brillanz anstreben („ultimate storage ring“) oder auf extrem kurze Pulse ausgelegt sind („free electron

laser“), könnte BESSY^{VS}R mit einer bisher nicht gekannten Flexibilität der Pulslänge für die Nutzer punkten.

„Wir haben damit begonnen, für BESSY^{VS}R eine Designstudie durchzuführen“, sagt Andreas Jankowiak. Zwar bietet BESSY II schon jetzt im „Low-Alpha-Betrieb“ Pulse von etwa zwei Pikosekunden an, doch um Störeffekte zu begrenzen, musste bisher die Intensität gesenkt werden. Dieser Modus eignet sich daher nicht für alle Forschungsfragen.

Doppelter Nutzen durch BERLinPro

„Bereits vor Jahren wurde von Wissenschaftlern in einer Veröffentlichung von G. Wüstefeld, J. Feikes und P. Kuske die Idee formuliert, kürzere Pulse mit neuen Hohlraumresonatoren zu erzeugen, die viel größere Beschleunigungsgradienten erzeugen können, als die zur Zeit bei BESSY II eingesetzten“, erklärt Jankowiak. Zurzeit gibt es vier Hohlraumresonatoren, die bei einer Frequenz von 500 Megahertz und einer Spannung von je 400 Kilovolt arbeiten, und in denen die Elektronen Energie aufnehmen. „Unsere Berechnungen zeigen, dass wir mit neuartigen Hohlraumresonatoren bei Frequenzen von 1,5 und 1,75 Gigahertz und insgesamt etwa 45 Millionen Volt Spannung variable Pulslängen von 1,5 bis 15 Pikosekunden bei voller Intensität erzeugen könnten.“ Die dafür notwendigen Hohlraumresonatoren müssten allerdings aus supraleitendem Niob gebaut und bei Temperaturen um zwei Kelvin betrieben werden. Außerdem müssen sie in der Lage sein, die hohen Ströme in einem Speicherring störungsfrei zu beschleunigen.

Als die ersten Ideen für BESSY^{VS}R entstanden, waren solche Kavitäten noch eine große technische Hürde. Mit dem Zukunftsprojekt BERLinPro hat sich die Situation verändert. „Genau solche Resonatoren werden auch für BERLinPro gebraucht. Die bereits begonnene Entwicklungsarbeit lohnt sich somit doppelt. Bis 2014 werden wir die Designstudie durchführen, sodass wir danach an die Umsetzung gehen können“, erklärt Andreas Jankowiak.

arö

TOP-UP-MODUS BEI BESSY II

BESSY II ist die führende Synchrotronlichtquelle der dritten Generation mit Schwerpunkt im weichen Röntgenbereich in Deutschland. Sie zieht jährlich rund 2.000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland an, die das Großgerät wegen seiner hervorragenden Zuverlässigkeit und Stabilität schätzen. An mehr als 50 Experimentierplätzen (Beamlines) können die Forscher Wellenlänge, Schwingungsrichtung (Polarisation) und Energie der Photonen ganz nach ihren Bedürfnissen einstellen.

Bis Herbst 2012 wurden alle acht Stunden neue Elektronen in den Speicherring eingeschossen, um die Verluste auszugleichen. Nun können in einem sogenannten Top-Up-Modus während des laufenden Betriebs etwa alle 30 bis 60 Sekunden Elektronenpakete nachgeschossen werden. Dafür wurde ein neuer Vorbeschleuniger vom Typ LINAC eingebaut. Zusätzlich wird die Strahlführung 150-mal pro Sekunde mit dem Fast-Orbit-Feedback nachkorrigiert. Diese Maßnahmen verbessern die Stabilität der empfindlichen Röntgenoptiken und sorgen dafür, dass den Experimentatoren nun eine nahezu konstante Lichtintensität zur Verfügung steht. Die HZB-Experten entwickeln das Großgerät stetig weiter.



HIGHLIGHTS AUS DEN NUTZEREXPERIMENTEN

2.970 Nutzerbesuche konnten 2012 am Elektronenspeicherring BESSY II in Berlin-Adlershof verzeichnet werden. Sie verteilten sich auf 494 Forschergruppen aus 31 Ländern.

26.775 Schichten zu je acht Stunden standen 2012 an den 39 Strahlrohren und Experimentierstationen von BESSY II zur Verfügung. Davon waren 14.200 Schichten für Experimente nutzbar. 12.575 Schichten wurden für umfangreiche Wartungs- und Upgrade-Arbeiten (siehe Bericht auf Seite 8/9) eingesetzt.

9.270 Schichten zu je acht Stunden nutzten externe Forscher an BESSY II. Weitere 2.101 Schichten entfielen auf interne Experimente von HZB-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. 2.829 Schichten wurden für das sogenannte Commissioning verwendet, das heißt das gezielte Einrichten einzelner Instrumente für die jeweiligen Experimente.

152 Tage mit acht Reaktorzyklen war die Ende März 2012 wieder hochgefahrte Neutronenquelle BER II in Berlin-Wannsee im vergangenen Jahr auf Leistungsbetrieb. Damit standen an den elf Instrumenten 1.672 Instrumententage zur Verfügung. Davon benötigten die Wissenschaftler 441 Tage für Wartung und Instrumentierung sowie 177 Tage für fortdauernde Upgrade-Arbeiten. Für Experimente nutzten die Forscher 1.054 Instrumententage.

75 Prozent der 1.054 Instrumententage an BER II nutzten Kooperationspartner für Kurzzeitprojekte und zwei Prozent für Langzeitprojekte. Weitere 23 Prozent der Instrumententage verwendeten HZB-Wissenschaftler für die Eigenforschung.

235 Kooperationen mit anderen wissenschaftlichen Einrichtungen unterhielt das HZB Ende 2012. Davon betrafen 152 die Forschung mit Photonen, Neutronen und Ionen (PNI) und 83 Erneuerbare Energien (EE).

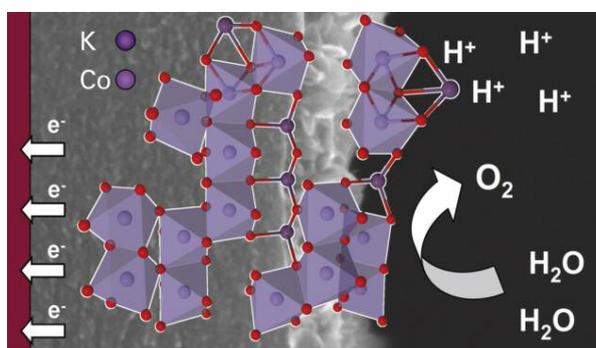
EIN KATALYSATOR MIT ZWEI GESICHTERN

Ein internationales Forscherteam um Prof. Dr. Holger Dau von der Freien Universität Berlin hat einen **Katalysator auf Kobaltbasis** untersucht, der sowohl die Sauerstoff- als auch die Wasserstoffbildung unterstützt. Damit könnte im großen Maßstab Sonnenenergie chemisch gespeichert werden.

Ein Problem bei der Energieversorgung durch Sonne und Wind liegt darin, dass sie manchmal deutlich mehr Strom liefern, als aktuell benötigt wird. Nachts oder bei Windstille kann es dagegen zu Versorgungsgaps kommen. Ein Lösungsansatz besteht darin, den überschüssigen Strom zu nutzen, um elektrolytisch Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff zu spalten. Denn Wasserstoff ist ein sehr guter chemischer Energiespeicher, kann als Treibstoff genutzt werden oder in einer Brennstoffzelle Strom erzeugen. Die dazu erforderliche chemische Reaktion hat jedoch einen gravierenden Nachteil: Ohne teure Katalysatoren aus Platin, Iridium oder Ruthenium wird zu viel Energie als Wärme freigesetzt, also verschwendet. „Wenn wir mit dieser Technologie auf einer global relevanten Skala Energie speichern wollten, würde das schon an der Knappheit dieser seltenen chemischen Elemente scheitern“, erklärt Prof. Dr. Holger Dau von der FU Berlin. Der Biophysiker und seine Mitarbeiter untersuchen im Rahmen des Exzellenzclusters Unifying Concepts in Catalysis (UNICAT) neuartige edelmetallfreie Katalysatoren, die die gewünschten Reaktionen beschleunigen.

Spannung ändert die Reaktionsrichtung

Erst vor kurzem machten sie eine überraschende Entdeckung. Sie untersuchten, wie sich in einer Lösung mit Kobalt-, Kalium- und Phosphatverbindungen quasi wie von selbst eine Katalysatorschicht an der Elektrode abscheidet. Dieser Prozess wurde erstmals im Jahr 2008 von dem Chemiker Dan Nocera vom MIT beschrieben und gilt seitdem als hoffnungsvoller Weg, um preiswerte Katalysatoren zu entwickeln. Bei Nocera bildete sich an der positiv geladenen Elektrode eine phosphathaltige Kobaltoxidschicht (O_2 -CoCat), die dort die Sauerstoffbildung beschleunigt. „Wir haben nun gezeigt, dass es auch umgekehrt geht“, berichtet Holger Dau. Dabei verwendeten sie dieselbe Lösung, legten aber statt der positiven Spannung eine negative Spannung an. Was sie fanden, erstaunte sie zunächst: Binnen Minuten entstand eine Beschichtung, die als Katalysator die Wasserstoffbildung beschleunigte: H_2 -CoCat. „Dann haben wir wieder eine positive Spannung angelegt



Durch das Anlegen einer negativen Spannung bildet eine Kobalt-, Kalium- und Phosphathaltige Lösung (violett-rot) eine Schicht an der Elektrode (grau), die als Katalysator die Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff fördert.

und tatsächlich beobachtet, wie sich der Katalysator wieder in den amorphen Kobaltoxidfilm O_2 -CoCat zurückverwandelt, den Nocera schon beschrieben hat.“ Die Reaktion kann immer wieder umgekehrt werden.

Am BESSY II untersuchte Dau zusammen mit Kollegen aus CEA und UDF, Grenoble, die mit Co-Cat-beschichteten Elektroden mit dem von ihm selbstentwickelten KMC1-Experiment, das einen Einblick in den atomaren Aufbau der Schichten ermöglicht. Beide Katalysatoren waren strukturell ähnlich: Aus der Lösung scheiden sich entweder robuste Nanoteilchen aus Kobaltoxiden an der positiven, Sauerstoff generierenden Elektrode ab oder aber – bei entgegengesetzter Polung – Kobalt-Hydroxid-Teilchen an der Wasserstoff generierenden negativen Elektrode.

Aufbau eines ständigen Experiments KMC3

Während die Schichten aus Nanoteilchen unter dem Elektronenmikroskop noch recht homogen wirken, zeigte die Analyse an BESSY II, dass sie auf der atomaren Skala völlig ungeordnet sind: Die Kobaltatome sind durch Sauerstoff miteinander verbunden und stapeln sich vermutlich in losen Schichten übereinander. Die Zwischenräume sind mit Wasser gefüllt, in denen Phosphatsalze gelöst sind. Solch ein Aufbau aus ungeordneten Fragmenten könnte auch die

katalytischen Eigenschaften gut erklären: Denn dadurch ist die aktive Oberfläche sehr groß, und gleichzeitig ermöglichen die Wassereinlagerungen den raschen Ionen-Transport. Ab Herbst 2013 will Dau mit seinem Team mit Hilfe von Prof. Dr. Alexej Erko das Nachfolgeexperiment KMC3 an BESSY II aufbauen. Es muss nicht mehr ständig auf- und abgebaut werden, sondern bleibt am Ort und steht damit auch anderen Nutzern zur Verfügung. Dann werden sie prüfen, ob und wie sich das Fernziel erreichen lässt: Ein ein-

faches, technisches System aus einer Solarzelle, deren Spannung zwei Elektroden speist, die sich von selbst mit den passenden Katalysatoren beschichten. Dann nämlich könnte die ehrgeizige Vision von Nocera wahr werden, nach der sich bald jeder Haushalt mit Solarenergie und Wasserstoffspeichern selbst versorgen kann. *arö*

Nature Mater. 11, 802-7 (2012), (DOI:10.1038/nmat3385): A Janus cobalt-based catalytic material for electro-splitting of water, Cobo et al

WIE SALZ IM REGENWALD ZU WOLKEN WIRD

Forscher des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz haben am HZB entschlüsselt, wie Pflanzen die **Nebel- und Wolkenbildung** im Regenwald beeinflussen. Das könnte dabei helfen, den Einfluss des Menschen auf den Klimawandel besser abzuschätzen.

Die Entstehung von Nebel und Wolken sind Naturphänomene, denen Forscher seit langer Zeit auf der Spur sind. Sie bilden sich, wenn die Luft feine Aerosolpartikel enthält, an denen Feuchtigkeit kondensiert. Während in Städten zum Beispiel Ruß und Staub als Kondensationskeime dienen, nahm die Forschung bislang an, dass die meisten Aerosolpartikel über dem Amazonas-Regenwald aus rein organischem Material bestehen und durch chemische Reaktionen von Gasmolekülen in der Atmosphäre gebildet werden. Der Regenwald ist für die Klimaforscher deshalb so interessant, weil er ein weitgehend vom Menschen unberührtes Ökosystem darstellt, an dem sich der vorindustrielle Zustand der Natur untersuchen lässt. Der Doktorand Christopher Pöhlker aus dem Team von Dr. Ulrich Pöschl und Prof. Dr. Meinrat O. Andreae am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz hat am BESSY II des HZB organische Aerosolpartikel untersucht, die im unberührten brasilianischen Regenwald nördlich von Manaus auf Luftfiltern und hauchdünnen Plättchen gesammelt worden waren. Dabei machte Pöhlker eine erstaunliche Entdeckung: „Wir haben drei Arten organischer Aerosolpartikel

gefunden und in allen waren Kaliumsalze enthalten“, berichtet er. „Anfänglich hatten wir uns auf den Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Stickstoffgehalt des organischen Materials konzentriert. Aber dann fanden wir zu unserer Überraschung auch sehr hohe Kaliumgehalte von bis zu 20 Prozent“, fügt der Chemiker hinzu. Die Entdeckung gelang mit Hilfe einer neuen Aerosol-Analysenmethode, die Pöhlker und andere Wissenschaftler mit dem Röntgenmikroskop MAXYMUS am BESSY II des Helmholtz-Zentrums Berlin und an den Synchrotron-Lichtquellen des Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien durchführen konnten.

Das Kalium wird von Pilzen und anderen Pflanzen im Regenwald ausgedünstet, allerdings ist noch unbekannt, warum sie die schwer flüchtigen anorganischen Salze freisetzen. Die winzigen Kaliumsalzpartikel bilden offenbar den Kern der Wolken-Kondensationskeime im Regenwald und beeinflussen so die Wolkenbildung und den Niederschlag. Die Ergebnisse helfen, die Quellen und den Einfluss organischer Aerosolpartikel zu identifizieren und zu quantifizieren. Das wiederum ist wichtig, um ihre Wechselwirkungen mit Wolken und Niederschlag im natürlichen Klimasystem des Regenwaldes zu verstehen. Die Forscher hoffen, dadurch zukünftig auch den Einfluss menschlicher Aktivitäten auf den globalen Klimawandel besser abschätzen zu können. *arö*

Science: Vol. 337 no. 6098 pp. 1075-1078 (DOI: 10.1126/science.1223264): Biogenic potassium salt particles as seeds for secondary organic aerosol in the Amazon, C. Pöhlker, K. T. Wiedemann, B. Sinha, M. Shiraiwa, S. S. Gunthe, M. Smith, H. Su, P. Artaxo, Q. Chen, Y. Cheng, W. Elbert, M. K. Gilles, A. L. D. Kilcoyne, R. C. Moffet, M. Weigand, S. T. Martin, U. Pöschl, M. O. Andreae



An Kaliumsalzen aus Pilzen und Pflanzen kondensieren organische Substanzen, sodass Aerosolpartikel entstehen. An diesen bilden sich Nebel- und Wolkentröpfchen im Regenwald.

WASSERSTOFF-TANKS FÜR DIE HOSENTASCHE

Ein internationales Team von Wissenschaftlern hat mit Neutronenstrahlen **Magnesiumlegierungen als mögliches Speichermaterial** für Wasserstoff untersucht.

Fragt man einen Naturwissenschaftler nach dem idealen Energiespeicher, kommt gern die Antwort „Wasserstoff“. Mit einem Kilogramm dieses leichtesten aller Elemente kommt ein Brennstoffzellen-Fahrzeug zum Beispiel rund fünfmal weiter als ein moderner Mittelklassewagen mit Benzin oder Diesel im Tank. Und ein Gramm Wasserstoff reicht im Laptop oder Handy für erheblich mehr Betriebsstunden als heutige Akkus. Obendrein kann man Wasserstoff in einer relativ einfachen Reaktion mit elektrischem Strom aus Windkraft- oder Solarenergieanlagen herstellen. Dabei wird nur Wasser verbraucht, von dem es auf der Erde reichlich gibt. Beim Verbrennen oder in einer Brennstoffzelle entsteht genau dieses Wasser wieder, aus dem der Wasserstoff gewonnen wurde. Um diesen umweltfreundlichen und nachhaltigen Energielieferanten gut nutzen zu können, forschen Helmut Fritzsche von den Chalk River Laboratories im kanadischen Ontario und Dr. Roland Steitz vom Helmholtz-Zentrum in Berlin an Speichermöglichkeiten für Wasserstoff.

Hybridlösung im Miniaturformat

Das größte Problem dabei: Wasserstoff ist ein sehr leichtes Gas. In diesem Zustand passen fünf Kilogramm gerade einmal in einen Gastank mit mehr als fünfzigtausend Litern Inhalt. Dieser wäre erheblich größer als der Mittelklassewagen, den er für eine Reichweite von 500 Kilometern mit Kraftstoff versorgen soll. Fahrzeughersteller verwenden daher Tanks, in denen das Gas mit 700 bar Druck eingefüllt wird. Als Energiespeicher für Handys und Laptops aber eignet sich diese Lösung kaum, weil niemand ein Gerät mit einem unter so hohem Druck stehenden Mini-Tank in der Tasche stecken haben möchte. Daher forschen Wissenschaftler rund um den Globus an Möglichkeiten, das Gas in fester Form zu speichern. Das gelingt häufig in Metallen oder Legierungen, die mit Wasserstoff rasch chemische Verbindungen bilden, sogenannte „Hydride“. Helmut



Solarenergieanlagen liefern nur Energie, wenn die Sonne scheint. Um die so gewonnene Energie auch später nutzen zu können, muss sie zunächst gespeichert werden. An praktischen Verfahren wie der Speicherung in Form von Wasserstoff wird am HZB intensiv geforscht.

Fritzsche interessiert sich in diesem Zusammenhang vor allem für das Leichtmetall Magnesium. Immerhin enthält ein Gramm Magnesiumhydrid 7,6 Prozent oder 76 Milligramm Wasserstoff und speichert daher viel Energie bei wenig Gewicht.

Das klingt vielversprechend. Obendrein gibt es weltweit große Mengen Magnesium, weshalb der Preis also kaum ein Problem sein sollte. Trotzdem aber tauchen beim Umsetzen in die Praxis erhebliche Probleme auf. So nimmt Magnesium Wasserstoff erst bei relativen hohen Temperaturen von circa 300 Grad Celsius rasch auf und gibt ihn genügend schnell wieder frei. Laden im normalen Klima würde also ewig dauern, und anschließend rückt das Material den gespeicherten Wasserstoff kaum wieder heraus. Ein guter Energiespeicher sieht anders aus.

BER II macht Wasserstoff sichtbar

Natürlich kennen Naturwissenschaftler eine Reihe von Möglichkeiten, solche Hürden zu überspringen. So beschleunigen Katalysatoren chemische Reaktionen wie sie beim Entstehen von Hydriden ablaufen und steuern so in

Richtung niedrigere Temperaturen beim Laden. Nehmen die Forscher statt reinen Magnesiums eine Legierung, die zusätzlich noch jeweils zehn Prozent Chrom und Vanadium enthält, verteilt sich der Wasserstoff möglicherweise schneller – auch das könnte die Ladezeit verkürzen. Das Ganze funktioniert anscheinend auch, wenn andere Metalle wie zum Beispiel Aluminium zugesetzt werden. Um solche Möglichkeiten auszuloten und zu verbessern, wollen die Wissenschaftler möglichst gut verstehen, wie diese Zusätze und Katalysatoren funktionieren. Genau an dieser Stelle kommen die Neutronen aus der Neutronenquelle BER II des HZB ins Spiel.

„Die Neutronenstrahlen machen sozusagen den Wasserstoff im System sichtbar“, erklärt Roland Steitz das Prinzip. Um die Abläufe zu beobachten, bauen die Forscher die Mini-Ausgabe eines Wasserstofftanks aus Magnesium oder einer Legierung aus Magnesium und anderen Metallen, der gerade einmal 50 Millionstel Millimeter dick ist. Obendrauf kommt eine fünf Millionstel Millimeter starke Schicht des bewährten, aber für den Alltagsgebrauch sehr teuren Katalysators Palladium, sowie eine gleich dicke Lage aus anderen Metallen wie Chrom und Vanadium oder auch Tantal, Nickel oder Titan. „Diese zusätzliche Metallschicht verhindert, dass Palladium in die darunter liegende Magnesium-Legierung wandert“, erklärt Helmut Fritzsche.

Ladevorgang im Detail untersucht

Genau wie ein Spiegel im Badezimmer Lichtstrahlen im gleichen Winkel reflektiert, in dem sie auftreffen, lenken auch die Atome in diesem Mini-Energiespeicher den Neutronenstrahl ab. Drehen die Forscher ihre Probe, ändert sich also auch die Richtung, in die jetzt die Neutronen streuen. Strömt später Wasserstoff in den Speicher, werden die Neutronen in den betroffenen Regionen anders reflektiert als vorher. Mit Hilfe dieser Änderung können die Forscher beobachten, wie sich der Wasserstoff in den einzelnen Schichten verhält. Sie können also jede einzelne Phase des Beladens und alle dabei auftretenden Probleme beobachten. Da Wasserstoff in einer leichten und einer schweren Variante in der Natur vorkommt, und das gewichtigere Deuterium Neutronen erheblich besser als sein leichter Zwilling Wasserstoff streut, füllen die Forscher allerdings das leichter zu beobachtende Deuterium in den Minispeicher.

Nach einigen Berechnungen verstehen die Wissenschaftler dann erheblich besser, wie das Magnesium den Wasserstoff oder das Deuterium aufnimmt. Der Katalysator Palladium ganz oben zerlegt den normalerweise in Molekülen aus zwei Atomen vorkommenden Wasserstoff in seine Einzelteile. Die entstehenden beiden „Wasserstoff-Radikale“ sind zwar flinker und dringen so schneller in die Magnesiumschichten des Tanks ein. Sie reagieren aber auch erheblich schneller mit dem Metall als die behäbigeren Wasserstoffmoleküle. „Daher bildet sich an der Oberfläche rasch eine Schicht aus



Mit dem Reflektometer (V6) an der Neutronenquelle BER II erhielten die Wissenschaftlern Einblicke in die Struktur der Magnesiumlegierungen.

Magnesiumhydrid, die das weitere Eindringen von Radikalen blockiert oder zumindest stark bremst“, erklärt Roland Steitz eines der Ergebnisse.

Diese Sperrschicht aus Magnesiumhydrid bildet sich aber nicht, wenn der eigentliche Speicher aus einer Magnesium-Chrom-Vanadium-Legierung besteht. Solche Ergebnisse setzen die Forscher auf die Fährte zu besseren Magnesium-Speichern, die Wasserstoff schneller oder bei tieferen Temperaturen aufnehmen und auch wieder abgeben. Mit ganz ähnlichen Experimenten verstehen Roland Steitz und Helmut Fritzsche zudem, wie die Wasserstofftanks aus einer Legierung aus 70 Prozent Magnesium und 30 Prozent Aluminium funktionieren. Außerdem können sie nach billigeren Katalysatoren suchen, die ähnlich wie das teure Palladium Wasserstoffmoleküle in Radikale zerlegen, die anschließend den Energiespeicher auffüllen. Mit solchen raffinierten Experimenten legen die Forscher also wichtige Etappen auf dem Weg zu neuen Wasserstoff-Speichern zurück.

rk

J. Phys. Chem. C 2012, 116 9), pp 5868–5880 (DOI: 10.1021/jp209296b): Probing the Room Temperature Deuterium Absorption Kinetics in Nanoscale Magnesium based Hydrogen Storage Multilayers using Neutron Reflectometry, X-ray Diffraction and Atomic Force Microscopy; W.P. Kalisvaart, E.J. Luber, E. Poirier, C.T. Harrower, A. Teichert, D. Wallacher, N. Grimm, R. Steitz, H. Fritzsche and D. Mitlin

ZUSAMMENGEFASST

- Wasserstoff ist ein idealer Energiespeicher, doch er hat für viele Anwendungen ein zu großes Volumen.
- Magnesium kann auf kleinem Volumen viel Wasserstoff aufnehmen – aber nur bei hohen Temperaturen.
- Legierungen mit Magnesium könnten das Problem lösen, aber wie sie funktionieren war unbekannt.
- Mit Neutronen aus der Neutronenquelle BER II konnten Wissenschaftler untersuchen, wie solche Legierungen Wasserstoff aufnehmen und abgeben.

MIT SALZEN DATEN SPEICHERN

Manche Salze zeigen ein überraschendes magnetisches Verhalten. Das macht sie zu gefragten Stoffen für **quantenphysikalische Grundlagenexperimente** – und weckt Hoffnungen auf neuartige leistungsfähige Speichermedien.

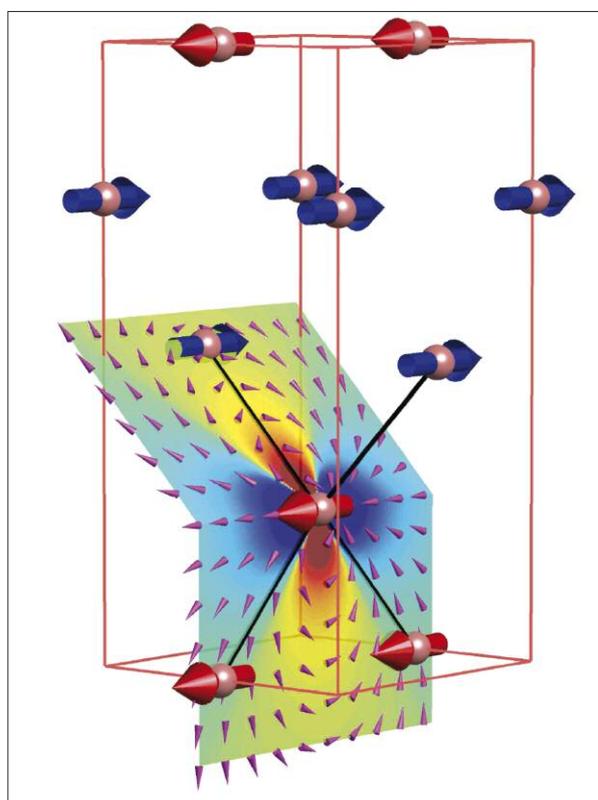
Magnetische Phänomene spielen in der Technik eine bedeutende Rolle: So sorgen Magnetfelder bei der Stromerzeugung in Gaskraftwerken oder Windkraftanlagen für die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie, in Elektromotoren setzen sie umgekehrt Strom in Bewegung um. Auf Computer-Festplatten speichern magnetisierbare Materialien Daten, die sich per Magnetfeld schreiben, lesen oder löschen lassen. Doch trotz der vielfältigen Nutzung sind etliche grundlegende Fragen zum Magnetismus noch nicht genau verstanden. Das gilt vor allem für die atomare Ebene, auf der Quanteneffekte dominieren.

Eine internationale Gruppe von Wissenschaftlern aus der Schweiz und Großbritannien hat nun zusammen mit Forschern des HZB einen Werkstoff entdeckt, der überraschende magnetische Eigenschaften besitzt: eine Verbindung aus Lithium, dem Seltenerd-Metall Erbium und Fluor. Das blass-rosafarbene Salz erwies sich als ideale Substanz, um magnetische Vorgänge zu analysieren – und für technische Anwendungen nutzbar zu machen. So eröffnet die Verbindung mit der chemischen Formel LiErF_4 vielversprechende Perspektiven für die Entwicklung neuartiger, besonders aufnahmefähiger und langlebiger Datenspeicher.

Mit zwei Messmethoden zum Erfolg

Für die experimentelle Untersuchung nutzten die Forscher des Labors für Quantenmagnetismus der École Polytechnique Fédérale (EPFL) in Lausanne und des Londoner Centre for Nanotechnology verschiedene Versuchsanlagen am HZB. Denn das Berliner Forschungszentrum bietet einzigartige Möglichkeiten für präzise Messungen der inneren Struktur und der magnetischen Merkmale kristalliner Materialien.

LiErF_4 besitzt kein nach außen hin wirksames Magnetfeld, dennoch wird sein innerer Aufbau durch magnetische Effekte geprägt. Physiker sprechen bei der magnetischen Struktur des Salzes von Antiferromagnetismus: Die Atome in dem Salz und ihre Spins – eine quantenmechanische Eigenschaft, die jedem Atom ein schwaches Magnetfeld



Das Bild zeigt die antiferromagnetische Anordnung der Spins im Material LiErF_4 . Den Forschern gelang es, sie mithilfe der Neutronenbeugung an der Neutronenquelle BER II zu entdecken.

verleiht, das dem Feld eines Stabmagneten ähnelt, – sind so angeordnet, dass sich die atomaren Magnetfelder paarweise gegenseitig aufheben. Darin unterscheiden sich antiferromagnetische Stoffe von Ferromagneten wie Eisen, in denen die Spins parallel orientiert sind und sich zu einem spürbaren Magnetfeld addieren.

Um die genaue Struktur des Materials zu entschlüsseln, nahmen es die Wissenschaftler auf zweierlei Weise unter die Lupe: durch Messungen der spezifischen Wärmekapazität und mithilfe der Beugung eines Neutronenstrahls. Für

die Wärmekapazitätsmessungen nutzten die Forscher das Laboratory for Magnetic Measurements (LaMMB) am HZB, für die Beugungsexperimente kam die Neutronenquelle BER II zum Einsatz. „Diese Kombination von zwei komplexen Messmethoden war entscheidend für die Aussagekraft der experimentellen Ergebnisse“, sagt Dr. Bastian Klemke, Forscher am HZB-Institut für Komplexe Magnetische Materialien. Ein weiterer Vorteil der vielfältigen Versuchseinrichtungen in Berlin: Hier lassen sich hochempfindliche Analysen zugleich bei extrem tiefen Temperaturen und in sehr starken Magnetfeldern realisieren.

Phasenwechsel bei tiefsten Temperaturen

Um Störungen durch die thermische Bewegung der Atome auszuschließen, kühlten die Forscher die Proben bis auf etwa 80 Millikelvin ab – 80 tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt, der bei minus 273,15 Grad Celsius liegt. Unter diesen Bedingungen variierten sie behutsam in kleinen Schritten die Temperatur. Gleichzeitig wurde ein Magnetfeld an die Probe angelegt, das die Forscher ebenfalls veränderten. Sie ermittelten für jeden Wert der experimentellen Variablen präzise die Wärmekapazität des Materials. So konnte das Team bei einer bestimmten Temperatur und Magnetfeldstärke einen markanten Phasenübergang beobachten: Die Substanz wechselte bei diesem kritischen Punkt drastisch ihre Eigenschaften.

Die Neutronenbeugungsmessungen bestätigten diesen Befund und erlaubten zudem einen detaillierten Blick auf die Anordnung der Atome in dem Kristall: Unterhalb einer Temperatur von etwa 370 Millikelvin bildete sich in dem Salz eine zweidimensionale magnetische Struktur heraus. „Das Material verhält sich, als ob es aus einer extrem dünnen Schicht bestünde, die nur von einer einzigen Lage Atome gebildet wird“, sagt Klemke – und das, obwohl die Proben in Wirklichkeit viel dicker waren. Offenbar spielen in dem Werkstoff verschiedene quantenmechanische Wechselwirkungen so zusammen, dass sich die Spins mit ihren magnetischen Momenten zu dicht aneinander liegenden monoatomaren Schichten koppeln. Diese Schichten behalten ihre individuellen Merkmale und dominieren das Verhalten des Kristalls – zur Überraschung der Wissenschaftler.

Diese wollen nun in weiteren Experimenten herausfinden, wie die ungewöhnliche Kopplung in dem Material zustande kommt. „Bei neuen Messungen, die am HZB im April 2013 begonnen haben, werden ähnliche Substanzen aus der gleichen Materialklasse untersucht“, sagt Klemke. Dazu gehören Lithium-Fluoride, die statt Erbium ein anderes Metall der Seltenen Erden enthalten.

Miniaturisierung von Datenspeichern

Die überraschenden magnetischen Eigenschaften machen diese Art von Salzen zu einem perfekten Modell, an dem

sich grundlegende quantenphysikalische Phänomene studieren lassen. Gleichzeitig könnten sie die Basis für Anwendungen in der Computertechnik sein – etwa als Baumaterial für Festplatten, die immense Datenmengen auf winzigem Raum fassen können. Die Funktionsweise von Festplattenspeichern beruht auf magnetisierbaren Stoffen, die in kleine Bereiche aufgeteilt sind – sogenannte Domänen –, in denen die Magnetisierung in zwei unterschiedliche Richtungen weisen kann. So lassen sich einfach digitale Bits aus Nullen und Einsen realisieren und in das Material einprägen.

Um mehr Daten in den Speicher packen zu können, muss man diese Bereiche verkleinern. Das geschieht bei der Miniaturisierung der Mikroelektronik seit vielen Jahren. Doch das Schrumpfen führt bei herkömmlichen Festplatten zunehmend zu Problemen. Denn während die winzigen Speicher-Bits immer dichter aneinanderrücken, beeinflussen sie sich zunehmend gegenseitig. Dadurch verändert sich die Magnetisierung, und die gespeicherten Daten gehen verloren. Mit den antiferromagnetischen Fluorid-Salzen ließe sich die Miniaturisierung dagegen mühelos weiter vorantreiben. Die Bits wären dabei am Ende so klein, dass sie nur aus einem einzigen Paar von Atomen mit entgegengesetzter Magnetisierung bestünden. Die Datenmenge, die sich in einem so gestalteten Speicher unterbringen ließe, wäre gewaltig. Und die Salze haben noch einen weiteren Vorteil: Die gespeicherten Daten blieben fast beliebig lange erhalten, denn die Bits würden sich nicht mehr gegenseitig stören. rb

Science 336 (6087): 1416-9, 2012, (DOI:10.1126/science.1221878): Dipolar antiferromagnetism and quantum criticality in LiErF_4 ;
C. Kraemer, N. Nikseresht, J.O. Piatek, N. Tsyrlin, B. Dalla Piazza, K. Kiefer, B. Klemke, T.F. Rosenbaum, G. Aeppli, C. Gannarelli, K. Prokes, A. Podlesnyak, T. Strässle, L. Keller, O. Zaharko, K.W. Krämer, H.M. Rønnow

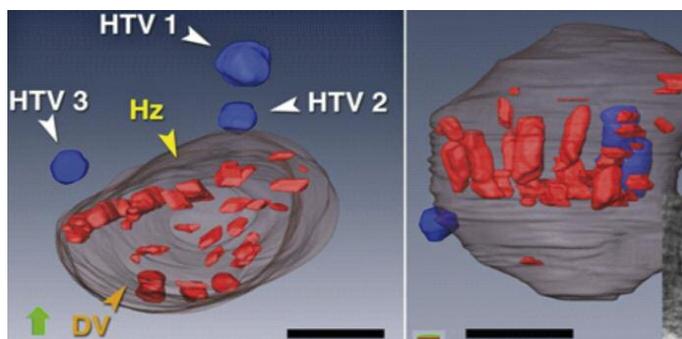
ZUSAMMENGEFASST

- Magnetisierbare Materialien spielen bei der Datenspeicherung eine herausragende Rolle.
- Ein Salz aus Lithium, Erbium und Fluor besitzt überraschende magnetische Eigenschaften, die es zum idealen Miniaturdatenspeicher machen.
- Ein internationales Forscherteam hat das Salz am HZB mit verschiedenen Methoden untersucht.
- Die Ergebnisse belegen einen quantenmechanischen Effekt als Ursache für das Verhalten.
- Weitere Forschung ist notwendig, um die Basis für die technische Nutzbarkeit zu legen.

DIE ACHILLESFERSE DES MALARIA-ERREGERS

Wissenschaftler des israelischen Weizman-Instituts haben am HZB den **Malaria-Erreger Plasmodium** untersucht. Ihre Ergebnisse könnten dazu beitragen, die Krankheit wirksam zu bekämpfen.

Zum Glück haben auch gefährliche Parasiten und Krankheitserreger eine „Achillesferse“. An solch einer Schwachstelle setzen meist die Medikamente an, mit denen Ärzte die von ihnen verursachten Krankheiten behandeln oder verhindern. Bei den Erregern der Gattung Plasmodium, die die weit verbreitete Tropenkrankheit Malaria auslösen, heißt dieser Schwachpunkt „Häm“. Das sind die eisenhaltigen Teile des Blutes, von der sich die einzelligen Krankheitserreger sowohl im Moskito als auch im Menschen ernähren. Dieses Häm ist eigentlich sehr giftig und müsste den Erreger töten. Plasmodien verknüpfen diese Moleküle



Mit Hilfe der weichen Röntgenstrahlen von BESSY II konnte die Anordnung der Hämokristalle (Hz, rot) in der Verdauungsvakuole (DV) des Malaria-Erregers erfasst werden.

aber zu großen Einheiten und entgiften sie so. Mit einem Röntgenmikroskop haben Forscher des israelischen Weizman-Instituts diesen Prozess näher untersucht. Medikamente gegen Malaria, wie etwa das aus dem Chinarenkenbaum gewonnene Naturheilmittel „Chinin“, werden in Peru seit Jahrhunderten von den Quechua-Indianern verwendet. Die Jesuiten brachten es nach Europa und behandelten damit 1631 zum ersten Mal erfolgreich Malariapatienten in Rom. Später kamen die sehr ähnlichen Medikamente Chloroquin und Mefloquin hinzu. Zunächst wirkten diese Substanzen hervorragend. Mit der Zeit aber müssen einige Plasmodien Widerstandskräfte gegen diese Medikamente entwickelt haben, denn inzwischen gibt es Erregerstämme, die gegen solche Wirkstoffe resistent sind.

Wirkung von Medikamenten verstehen und verbessern

Um bessere Malariamedikamente entwickeln zu können, müssen Ärzte und Forscher erst einmal verstehen, wie Chinin und Co. überhaupt wirken. Bislang wissen sie nur, dass die Arznei offensichtlich die Entgiftungsreaktion der Plasmodien stört, bei der die Eisenhaltigen Moleküle zu einer „Hämazoin“ genannten Verbindung verknüpft werden, die nicht mehr giftig ist und daher in dem Einzeller gelagert werden kann. Um mehr über diesen Vorgang zu erfahren, haben die Forscher des Weizman-Instituts in Plasmodien hineingeschaut. „Das klappt mit den weichen Röntgenstrahlen mit einer Energie von einem halben Kiloelektronenvolt aus der Synchrotronquelle BESSY II besonders gut“, berichtet Gerd Schneider vom HZB. „Genau in diesem Energiebereich liegt nämlich ein sogenanntes Wasserfenster, in dem die Röntgenstrahlen das in der Zelle vorhandene Wasser übersehen“, erklärt der Physiker. Andere wichtige Elemente in lebenden Organismen wie Kohlenstoff oder Stickstoff dagegen bildet die Röntgenstrahlung sehr gut ab. Daher konnten die Forscher die Strukturen der Zelle gut beobachten und herausfinden, wo sich das Hämazoin im Plasmodium bildet. Das passiert wie erwartet in einer winzigen Organelle des Erregers, das Biologen als „Verdauungsvakuole“ bezeichnen. „Eine spannende Frage aber war, ob das eher in einer wässrigen Umgebung oder in winzigen Fett-Tröpfchen geschieht“, erklärt Gerd Schneider weiter. Diese Information ist für die Hersteller von Medikamenten wichtig, weil deren Wirkung von dieser Umgebung stark beeinflusst wird. Mit dem Berliner Röntgenmikroskop haben die Forscher herausgefunden, dass sich die Kristalle in den wässrigen Bereichen der Verdauungsvakuole bilden. Nun können sie in weiteren Experimenten die Wirkung von Malariamedikamenten dort näher unter die Lupe nehmen. Vielleicht gelingt ihnen damit ein weiterer Schritt im Kampf gegen Malaria. rk

PNAS (doi: 10.1073/pnas.1118120109): Oriented nucleation of hemozoin at the digestive vacuole membrane in Plasmodium falciparum; S. Kapishnikov, A. Weiner, E. Shimoni, P. Guttman, G. Schneider, N. Dahan-Pasternak, R. Dzikowski, L. Leiserowitz and M. Elbaum

MEHR LEISTUNG DURCH DEFEKTE

Forscher haben am HZB herausgefunden, dass **Fehlorderungen in der Kristallstruktur** die Reaktionsgeschwindigkeit eines Katalysators zur Methanolsynthese erhöhen.

Manchmal eilt die industrielle Anwendung dem wissenschaftlichen Verständnis voraus: So hat sich in der Herstellung von Methanol ein Katalysator aus Kupfer, Zink- und Aluminiumoxid ($\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$) bewährt, der die besten Ergebnisse liefert. Doch warum das so ist, war Wissenschaftlern bislang ein Rätsel. „Wegen seiner komplexen Nanostruktur wurde das Verfahren bislang nicht besonders gut verstanden“, erklärt Malte Behrens vom Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, „mit unseren Erkenntnissen gibt es nun eine Antwort.“ Er leitete eine Gruppe von 14 Wissenschaftlern unterschiedlicher Einrichtungen, die Arbeiten an den Großgeräten wurden mit den Teams der Helmholtz-Zentren durchgeführt.

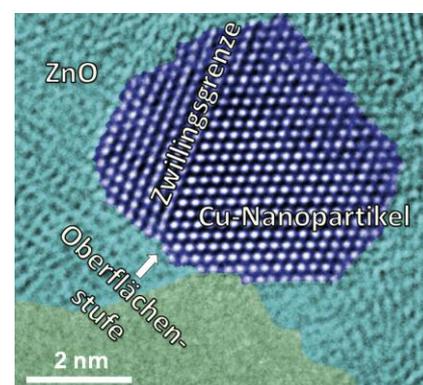
Methanol zählt mit einer weltweiten Jahresproduktion von rund 50 Millionen Tonnen zu den wichtigsten Grundchemikalien, es kommt zum Beispiel bei der Herstellung von Polymeren zum Einsatz. In Bezug auf die Energiewende könnte Methanol künftig auch eine Rolle als flüssiger Kraftstoff spielen. Das in der Industrie verwendete Methanol wird derzeit aus Kohle und Erdöl gewonnen. Die Herstellung läuft am Methanolsynthesekatalysator bei Temperaturen von 200 bis 300 °C und unter einem Druck von 50 bis 100 bar ab. Behrens und seine Kollegen haben für ihre Untersuchung die Ergebnisse von fünf unterschiedlichen Katalysatoroberflächen mit denen einer reinen Kupferoberfläche verglichen. Die Größe der Nanopartikel entsprach mit 5 bis 15 nm der Größe industrieller Katalysatoren, ebenso vergleichbar waren die Reaktionsbedingungen wie Druck, Temperatur und die verwendeten Synthesegase.

Übereinstimmung von Theorie und Experiment

„Die Neutronenexperimente zeigten, dass die besonders aktiven Katalysatoren die mit den meisten Baufehlern in der Kristallstruktur sind“, erklärt Michael Tovar, Instrumentverantwortlicher für das Neutronenpulverdiffraktometer E9 am HZB. Während der Katalysatorsynthese entstehen sogenannte Kristallbaufehler, das heißt Abweichungen von der Idealstruktur in Form von Versetzungen, Korngrenzendefekten und Stapelfehlern. Wo diese auf die Oberfläche der Kupferpartikel treffen, fehlen den Atomen ihre direkten

Nachbarn und es entstehen besonders reaktive Zentren mit hoher Oberflächenenergie. Wissenschaftler der Universität Stanford lieferten parallel zu den Experimenten Berechnungen mithilfe der Dichtefunktionaltheorie. „Die Theoretiker haben gezeigt, dass die Anwesenheit von Zink und die Oberflächenstruktur eine wesentliche Rolle spielen“, erläutert Behrens, „hier passte sehr gut, dass sich die beobachteten Experiment-Eigenschaften auch in der Theorie als entscheidende Parameter erwiesen.“ Die Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Effizienz des Katalysators durch die Oberflächendefekte erheblich höher ist, als die bisher auf Grundlage der gesamten freiliegenden Cu-Oberfläche berechneten Werte.

Die Kooperation hat sehr gut funktioniert und wird fortgesetzt, berichtet Behrens: „Wir hatten seit jeher eine enge Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen vom HZB. Aktuell untersuchen wir an der Neutronenquelle in einem Langzeitprojekt die Katalysatorstabilität. Dabei gehen wir mit dem Neutronen-Diffraktometer der Frage nach, wie sich die Defektstruktur im Laufe der Zeit verändert und wie der Methanolsynthese-Katalysator in unterschiedlichen Umgebungen reagiert.“



Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Kupfernanopartikels in einem hochaktiven Cu/ZnO-Methanolsynthese-Katalysator. Gitterbaufehler wie die hier gezeigte Zwillingsgrenze enden an der Partikeloberfläche und führen zu Oberflächendefekten.

Science 336, 893 (2012); (DOI: 10.1126/science.1219831): The Active Site of Methanol Synthesis over Cu/ZnO/Al₂O₃ Industrial Catalysts, M. Behrens, F. Studt, I. Kasatkin, S. Kühl, M. Hävecker, F. Abild-Pedersen, S. Zander, F. Girgsdies, P. Kurr, B.-J. Kniep, M. Tovar, R. W. Fischer, J. K. Nørskov, R. Schlögl

FEHLERSUCHE IM ZELLBAUKASTEN

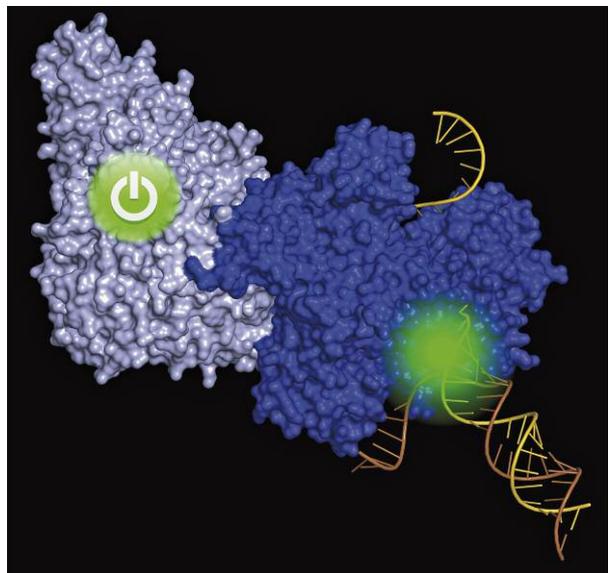
Wissenschaftler der FU Berlin und des MPI haben an BESSY II das Enzym Brr2, eine wichtige **Steuereinheit in Zellen**, untersucht. Das Verständnis ihrer Arbeitsweise könnte zum Ansatzpunkt zur Heilung von Sehschwäche werden.

Für einen Biochemiker wie Prof. Dr. Markus Wahl vom Institut für Chemie und Biochemie der Freien Universität Berlin ähneln die Zellen von Pflanzen, Tieren, Hefen und Pilzen ein wenig einem Ameisenhaufen: Pausenlos passiert in ihnen etwas, aber der Forscher weiß häufig weder, wie die einzelnen Vorgänge genau ablaufen, noch was sie bewirken. Nur eines ist sicher: Ohne diese genau aufeinander abgestimmten Reaktionen liefe in der Zelle wenig. Fällt nur eine davon aus, kann das fatale Konsequenzen haben. Das Enzym Brr2 spielt zum Beispiel eine zentrale Rolle beim Herstellen der Kopien von Bauanleitungen für die Produktion verschiedener Eiweiße. Fehler in diesem Enzym lassen schon bei jungen Menschen die Sehkraft schwinden. Kein Wunder also, dass sich Wahl das Enzym mit den Möglichkeiten der modernen Struktur-Biochemie genauer ansehen wollte.

Grundsätzlich speichert jede Zelle in ihrem Erbmateriale die Bauanleitungen für alle Eiweiße. Aus diesen Proteinen wiederum bestehen ganz oder zu einem großen Teil sehr viele Zellstrukturen. Bevor sie ein solches Eiweiß produziert, fertigt die Zelle erst einmal eine Kopie dieser Bauanleitung an, die Biochemiker „Erbanlage“ oder kurz „Gen“ nennen. Dieses Kopieren aber ist gar nicht so einfach, weil die eigentliche Bauanleitung häufig von unterschiedlich großen Abschnitten unterbrochen ist, die gar keinen Bauplan enthalten. Solche „Intron“ genannten Einschübe werden zunächst mit in die Bauanleitung kopiert und anschließend in einem „Spleißen“ genannten Vorgang wieder herausgeschnitten.

Steuerung der Intron-Schere

„Das Spleißen ist ein sehr komplizierter Vorgang, an dem etliche verschiedene Proteine und andere Moleküle in der Zelle mitwirken“, erklärt Markus Wahl. Zusammen bilden die Bestandteile ein „Spliceosom“. Diese Zellmaschine garantiert das korrekte Herausschneiden der Introns. Allerdings ist das Spliceosom eine Art Baukasten: Bei jedem weiteren Arbeitsschritt kommen neue Bestandteile zu der Zellmaschine dazu, während andere nicht mehr benötigt werden und wieder verschwinden. Das Spliceosom holt sich also für



Das blau markierte Enzym Brr2 arbeitet am leuchtend grünen Fleck rechts gerade an den gelb und rot gezeigten Erbgutkopien, links befindet sich die graue Schalter-Einheit.

jeden Arbeitsschritt das dafür nötige Werkzeug und legt die nicht mehr gebrauchten Bestandteile weg. Bei der Auswahl der Werkzeuge steuert das Enzym Brr2 das Auspacken des Schneideapparates, der die Introns entfernt. Anders als andere Teile des Spliceosoms aber bleibt der Steuermann auch dann an Bord, wenn er gerade nicht gebraucht wird. Um die Intron-Scheren nur genau zum richtigen Zeitpunkt auszupacken, muss es also eine Kontrolle geben, die Brr2 ein- und ausschaltet. Wie aber funktionieren Kontrolle und Steuerung? Um das herauszubekommen, haben Karine dos Santos und Markus Wahl von der FU Berlin gemeinsam mit Sina Mozzafari Jovin und Prof. Dr. Reinhard Lührmann vom Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen Brr2 genauer untersucht. „Genauer“ heißt, dass sie wissen wollten, wie die einzelnen Atome des Proteins angeordnet sind. Um einzelne Atome zu sehen, hat sichtbares Licht aber eine viel zu große Wellen-

länge. Dazu benötigt man vielmehr intensives Röntgenlicht, das zudem sehr kurze und eine genau definierte Wellenlänge aufweist. Nur so lassen sich Strukturen von atomarer Größe aufklären. Deshalb waren die Struktur-Biochemiker um Markus Wahl auf die Röntgenstrahlung aus der Synchrotron-Anlage BESSY II angewiesen, die ihnen genau dieses Röntgenlicht in der geforderten Qualität lieferte.

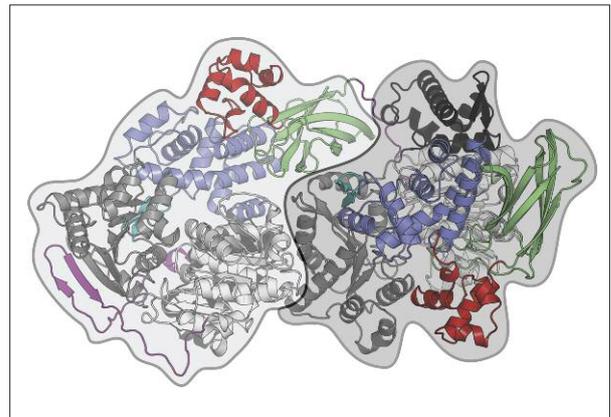
Zwei verschiedene Hälften eines Proteins

Zunächst züchteten die Forscher aus den Proteinen Kristalle, weil nur darin die Atome sehr regelmäßig angeordnet sind und untersucht werden können. Das klappt zwar nur bei einem Teil der Proteine, doch zum Glück gehört Brr2 dazu. In den Kristallen wird das Röntgenlicht dann von den Atomen abgelenkt. Aufwändige Computerprogramme berechnen aus dem Streumuster der Röntgenwellen, wie die einzelnen Atome angeordnet sind.

Schon vor dieser Röntgenkristallographie wussten die Forscher, dass Brr2 aus zwei Hälften besteht, die sich sehr stark ähneln, aber offensichtlich auch einige Unterschiede aufweisen. Tatsächlich entpuppte sich nur ein Teil des Doppel-Proteins als Steuereinheit für das Auspacken der Intron-Scheren, während die andere Hälfte anscheinend den aktiven Teil reguliert. Die Kontrolle für das Ein- und Ausschalten von Brr2 könnte also in der für die Steuerung des Spliceosoms nicht zuständigen Hälfte des Enzyms liegen. Möglicherweise kontrolliert dieser Teil auch das Tempo, in dem die Intron-Scheren ausgepackt werden. Obwohl die Kontrollhälfte mit diesem Prozess direkt nichts zu tun hat, werden die Schneidewerkzeuge nämlich mit Hilfe der Kontrolleinheit viel schneller ausgepackt als ohne. Wie die Kontrolle der einen über die andere Hälfte funktioniert, ahnt Markus Wahl bereits: „In der nicht für das Auspacken der Intron-Scheren zuständigen Hälfte sehen wir Bereiche, an denen sich ATP bindet“, berichtet der Biochemiker. „ATP“ steht für Adenosintriphosphat. Das ist ein kleines Molekül, das lebende Zellen oft als eine Art Batterie nutzen, die Energie speichert und bei Bedarf rasch an die Zelle liefert. In der Kontrolleinheit von Brr2 aber gibt diese Batterie überhaupt keine Energie ab. Aus welchem Grund aber schnappt sich diese Hälfte des Enzyms dann das ATP? Vielleicht ist das gerade der Schritt, der das Tempo steuert, in dem die Intron-Scheren ausgepackt werden?

Folgenreiche Fehler beim Spleißen

Doch weshalb gibt es überhaupt unterschiedliche Geschwindigkeiten, mit denen die Schneidewerkzeuge ausgepackt werden? Bei dieser Frage wirft Markus Wahl den Begriff „alternatives Spleißen“ in die Diskussion: Viele Gene liefern nämlich die Baupläne für mehrere Proteine. Das funktioniert zum Beispiel so: Für ein Protein werden alle Introns herausgenommen, für ein zweites aber bleibt eines oder auch mehrere der Introns drin. Enthält ein Gen mehrere potentielle Introns, kann es aus der gleichen Erbanlage



Der aktive Bereich des Enzyms Brr2 auf der linken Seite ist seiner Reglereinheit rechts sehr ähnlich.

daher durch alternatives Spleißen einige verschiedene Proteine herstellen. Das erklärt auch, wie eine menschliche Zelle aus gerade einmal 33.000 Genen einige hunderttausend unterschiedliche Proteine herstellen kann. Alternatives Spleißen kann so für gravierende Unterschiede sorgen. In der befruchteten Eizelle der Fruchtfliege *Drosophila* zum Beispiel entscheidet diese Alternative in einem bestimmten Gen darüber, ob ein weibliches oder eine männliches Insekt heranwächst. Wenn die Kontrolleinheit nun das Tempo steuert, mit dem Brr2 die Intron-Scheren auspackt, kann sie damit vielleicht auch steuern, welche Alternative beim Spleißen bevorzugt wird. Möglicherweise spielt genau diese subtile Steuerungsmethode eine Rolle, wenn junge Menschen immer schlechter sehen, weil sich in ihr Brr2 Fehler eingeschlichen haben? Noch sind das alles nur Vermutungen, denen Markus Wahl und seine Kollegen in Zukunft auf den Grund gehen wollen. rk

Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2012; 109 (43): 17418-23. (DOI: 10.1073/pnas.1208098109): Structural basis for functional cooperation between tandem helicase cassettes in Brr2-mediated remodeling of the spliceosome, Karine F. Santosa, Sina Mozaffari Jovinb, Gert Webera, Vladimir Penab, Reinhard Lührmann and Markus C. Wahl

ZUSAMMENGEFASST

- Das Enzym Brr2 spielt im Körper eine wichtige Rolle beim sogenannten Spleißen, bei dem Kopien der Bauleitungen von Eiweißen hergestellt werden.
- Fehler bei diesem Vorgang können Krankheiten wie Sehschwäche verursachen.
- Ein Forscherteam hat mit Röntgenstrahlung von BESSY II den Vorgang auf atomarer Ebene untersucht.
- Für konkrete Behandlungsmöglichkeiten ist aber noch weitere Forschung notwendig.



HIGHLIGHTS AUS DER EIGENEN FORSCHUNG

1.173 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiteten Ende 2012 am Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie auf grund- und sonderfinanzierter Basis, darunter 66 Auszubildende. Mit 307 Mitarbeiterinnen lag der Frauenanteil unter den Beschäftigten am HZB bei circa 26 Prozent.

130 Doktoranden wurden 2012 vom Helmholtz-Zentrum Berlin betreut. 79 von ihnen arbeiteten für ihre Dissertation im Forschungsbereich Photonen, Neutronen und Ionen (PNI), 51 im Bereich Erneuerbare Energien.

478 ISI-zitierte Publikationen wurden 2012 von den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am HZB veröffentlicht. Dazu kamen weitere 42 referierte Publikationen, darunter auch die in den Programmen getrennt

ausgewiesene Anzahl von Büchern und Buchbeiträgen. Insgesamt stammten 377 Publikationen aus dem Bereich PNI und 143 Publikationen aus dem Bereich Erneuerbare Energien.

164 laufende Kooperationen unterhielt das HZB Ende 2012 mit der Wirtschaft. Davon entfielen 101 auf den Bereich Erneuerbare Energien und 63 auf die Forschung mit Photonen, Neutronen und Ionen.

Elf Patente wurden dem HZB 2012 erteilt, darunter acht im Bereich Erneuerbare Energien und drei im Bereich PNI. Der Schutzrechtsbestand des HZB umfasste 349 Schutzrechte zum Jahresende 2012: 101 Schutzrechte aus dem Bereich Struktur der Materie und 248 Schutzrechte aus dem Bereich Erneuerbare Energien.

MAGNET-VENTIL IM SANDWICH-STIL

Ein am HZB entwickeltes magnetisches Ventil legt die Basis für den Bau besserer **nicht-flüchtiger Datenspeicher** – und hilft, bislang ungeklärte fundamentale Fragen der Nanophysik zu beantworten.

Magnetische Speicher haben einen klaren Vorteil: Sie behalten die gespeicherten digitalen Daten auch nach dem Abschalten der Stromversorgung.

Darin unterscheiden sie sich von herkömmlichen elektrischen Speichern, bei denen die Information ohne kontinuierlichen Stromfluss augenblicklich verlorengeht. Daher müssen die Daten nach dem Einschalten des Computers erst von der Festplatte in den – flüchtigen – Arbeitsspeicher geladen werden. Bei Magnetspeichern entfällt dieses zeitaufwendige Booten.

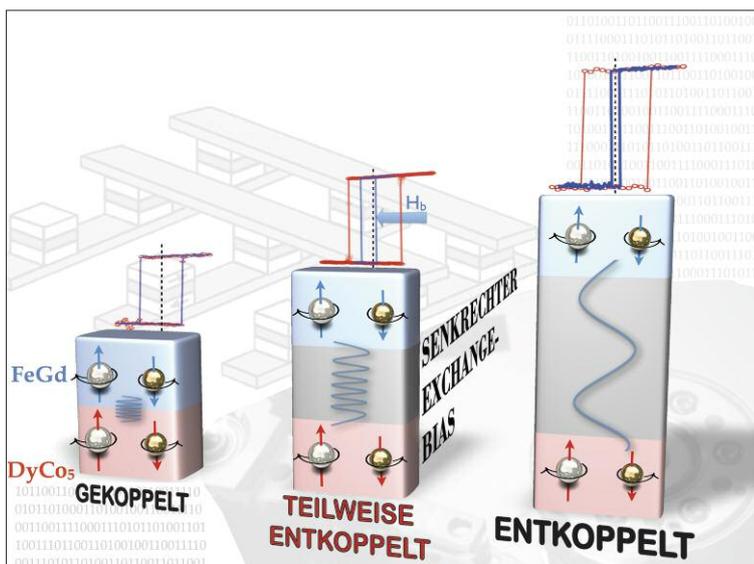
Bereits heute gibt es mit der MRAM-Technologie eine Möglichkeit, Computerdaten magnetisch zu speichern. Doch diese Bauteile konnten sich bislang nicht am Markt durchsetzen, weil sie teuer sind und die Informationen nur für eine begrenzte Zeit behalten können. Nach einigen Jahren lassen thermische Effekte auch bei MRAM-Speichern das Datengedächtnis allmählich schwinden. Nun hat

der HZB-Wissenschaftler Dr. Florin Radu eine elegante Lösung gefunden, um diese Beschränkung zu überwinden.

Untersuchung ultradünner magnetisierbarer Schichten

Als Radu gemeinsam mit Forscherkollegen damit begann, in seinem Labor am HZB das Verhalten von dicht übereinander liegenden, ultradünnen, magnetisierbaren Schichten zu untersuchen, trieb ihn schlicht die wissenschaftliche Neugier an. Der Physiker, der am Berliner Institut für Komplexe Magnetische Materialien forscht, präparierte zwei Lagen aus verschiedenen magnetisierbaren Metall-Legierungen so, dass er ihnen mithilfe eines außen angelegten Magnetfelds zu Leibe rücken konnte. Ziel war es, die makroskopischen magnetischen Eigenschaften der Werkstoff-Kombination zu verändern und zu ergründen, was dabei auf atomarer Ebene geschieht.

Dazu verwendeten die Forscher zwei metallische Legierungen: Die eine bestand aus Eisen und Gadolinium, die andere aus Kobalt und Dysprosium. Das gemeinsame Merkmal der Substanzen: Beide sind ferrimagnetisch. Mit diesem Attribut bezeichnen die Physiker Festkörper, deren Spins – charakteristische quantenmechanische Eigenheiten der Atome – parallel ausgerichtet sind, aber in entgegengesetzte Richtungen weisen. Dasselbe gilt damit auch für die atomaren magnetischen Momente, die untrennbar mit den Spins verbunden sind. Da diese atomaren Magnete bei den zwei Elementen in den Legierungen unterschiedlich stark sind, bleibt insgesamt trotz der gegenläufigen Orientierung der Spins ein schwaches, nach außen wirkendes Magnetfeld übrig. Der Unterschied zwischen den beiden Materialschichten: Die Verbindung aus Eisen und Gadolinium ist magnetisch „weich“ – seine Eigenschaften lassen sich durch ein externes Magnetfeld recht leicht variieren. Die Kobalt-Dysprosium-Legierung ist dagegen



Die harten und weichen ferrimagnetischen Legierungen (blau und rot) sind ohne Trennschicht magnetisch eng gekoppelt und beeinflussen sich gegenseitig. Eine Trennschicht aus Tantal (grau) hilft dabei, ihre magnetische Ausrichtung durch ein externes Magnetfeld separat steuern zu können. Damit werden die Schichten als magnetischer Datenspeicher nutzbar.

magnetisch „hart“ – und lässt sich daher von einem äußeren Feld kaum beeinflussen.

Starke Kräfte im Grenzbereich von zwei Materialfilmen

Die Experimente an dem Dünnschicht-Doppelpack erwiesen sich als schwieriger als das Team um Florin Radu es erwartet hatte. Denn im Grenzbereich zwischen den beiden Materialfilmen herrschten so starke Kräfte, dass sich die Schichten magnetisch regelrecht ineinander verkrallten und durch äußere Einflüsse kaum zu trennen waren. Daher ersannen die HZB-Wissenschaftler, die bei dieser Arbeit mit Forscherkollegen der Ruhr-Universität Bochum und der niederländischen Universität Nijmegen zusammenarbeiteten, einen Trick: Sie fügten zwischen die ferrimagnetischen Filme eine nur wenige Atomlagen dünne isolierende Zwischenschicht aus Tantal ein. Der feine Abstandshalter dämpfte die magnetischen Kräfte, wodurch es gelang, die beiden anderen Schichten teilweise zu entkoppeln.

„Dennoch konnten wir die magnetische Wechselwirkung auch durch die Zwischenschicht hindurch noch feststellen“, berichtet Radu – und zwar umso schwächer, je dicker diese Schicht gewählt wurde. Diese Anordnung stellte sich als überaus praktisch heraus. Denn die Forscher konnten so den Zustand des magnetisch weichen Metalls durch sanftes Verändern eines äußeren Felds gezielt und präzise steuern. Der magnetisch harte Gegenpart in dem Material-Sandwich blieb davon weitgehend unbeeindruckt – und diente damit dem gesamten System als fester magnetischer „Anker“.

Die überraschenden experimentellen Resultate wecken Hoffnung auf Fortschritte in der digitalen Speichertechnologie. Denn das untersuchte Schichtsystem verhält sich wie ein „magnetisches Ventil“ oder „Spin-Ventil“ – ein Gebilde, das für die Datenspeicherung überaus verheißungsvolle Merkmale besitzt. Damit lassen sich Speicher-Bausteine kreieren, die Informationen mithilfe magnetischer Effekte konservieren – und nicht durch elektrische Spannungen, wie bei den bislang in den meisten Computern gebräuchlichen Arbeitsspeichern. Und: Das von Florin Radu und seinen Forscherkollegen aus Bochum und den Niederlanden erschaffene Magnet-Ventil weist deutliche Vorzüge gegenüber den bisher verfügbaren Magnetspeichern auf, die auf der MRAM-Technologie basieren.

Neuartige Kontrolle über die Dauer der Datenspeicherung

„Bei unserem System kann man die Flüchtigkeit kontrollieren“, sagt Radu. „Das ist wirklich neu.“ Es lässt sich nach Belieben festlegen, ob die abgelegten Informationen Wochen, Monate oder viele Jahre konserviert werden sollen. Danach lässt sich das System in den ursprünglichen Zustand zurückversetzen und neu mit Daten füllen. „Die

Lebensdauer eines solchen Speichers ist praktisch unbegrenzt“, sagt Radu. „Es würde mich daher nicht wundern, wenn Spin-Ventile bald als Datenspeicher in PCs, Smartphones oder Tablet-Computern eingesetzt würden.“

Einen Patentantrag für die Entdeckung hat das HZB bereits im Frühjahr 2012 beim Deutschen Patentamt eingereicht. Ein Antrag für ein internationales Patent soll demnächst folgen. Die Forscher am HZB arbeiten derweil eifrig daran, die Eigenschaften und die Handhabbarkeit ihres pfiffigen Systems weiter zu verbessern: „So wollen wir künftig einen Laser nutzen, um die magnetischen Zustände zu beeinflussen und zu kontrollieren“, verrät Radu, der dabei auch mit Unternehmen aus der Computerindustrie zusammenarbeitet.

Einblick in die Ursachen von Austausch-Anisotropie erwartet

Doch der größte Wert seiner Entdeckung liegt für den Physiker in neuen grundlegenden Erkenntnissen, die sich damit gewinnen lassen. Die physikalischen Vorgänge in dem exotischen Sandwich ermöglichen einen tiefen Einblick in die Wechselwirkungen zwischen nanometerdünnen Schichten. Und das bietet die Chance, einen Effekt zu verstehen, der bereits vor mehr als 50 Jahren entdeckt wurde: die Austausch-Anisotropie. Dieses Phänomen, das zwischen ferro- und antiferromagnetischen Filmen auftritt, wird in den Schreib- und Leseköpfen der meisten modernen Festplatten genutzt. „Doch die Details der physikalischen Prozesse, die sich hinter dem Effekt verbergen, sind bis heute nicht genau verstanden“, sagt Florin Radu. „Es gibt zwar einige Theorien dazu – doch es ist unklar, welche Beschreibung zutrifft.“ Radu ist überzeugt: Das am HZB gewonnene neue Verständnis vom Magnetismus dünner Schichten wird endlich für Klarheit sorgen.

rb

Nature Communications, 3, 715, (DOI: 10.1038/ncomms1728): Perpendicular exchange bias in ferrimagnetic spin valves, F. Radu, R. Abrudan, I. Radu, D. Schmitz & H. Zabel

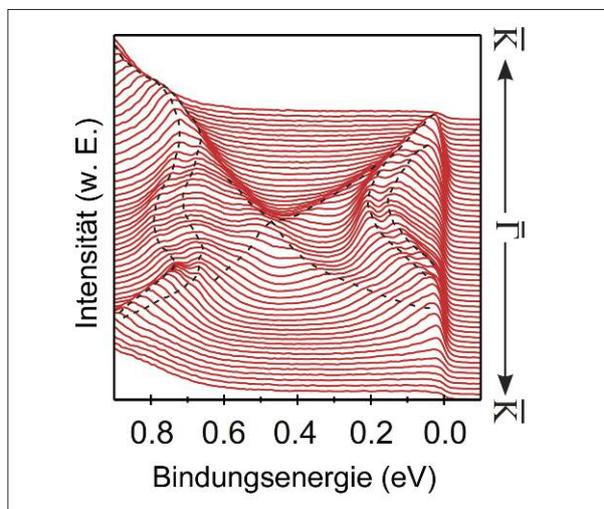
ZUSAMMENGEFASST

- In magnetischen Speichern können Daten auch ohne kontinuierliche Stromzufuhr gesichert werden. Bislang sind sie jedoch zu teuer und unzuverlässig.
- Forscher des HZB haben bei Experimenten mit ultradünnen magnetisierbaren Schichten ein sogenanntes magnetisches Ventil entdeckt.
- Damit könnte man theoretisch Datenspeicher bauen, die Informationen durch magnetische Effekte beliebig lange speichern können.

TOPOLOGISCHE ISOLATOREN IM VISIER

Wissenschaftler des HZB haben eine neue Materialklasse, die topologischen Isolatoren, eingehend untersucht. Quanteneffekte sorgen in ihnen bei Raumtemperatur für ungewöhnliche Eigenschaften. Dies könnte eine Option für **Quantencomputer** und ultraschnelle Schalter werden.

Vor wenigen Jahren erstaunten Theoretiker der Quantenmechanik die Fachwelt mit folgender Vorhersage: Es müsste einen Kristall geben, der an der Oberfläche Strom extrem gut leitet, im Inneren dagegen ein Isolator ist. Sie bezeichneten diesen Kristall als topologischen Isolator und lieferten natürlich auch eine Begründung, warum es ihn geben müsse: Dies liegt an den Zuständen, die die Elektronen an der Oberfläche beziehungsweise im Innern des Kristalls einnehmen dürfen. Dabei sind Spin und Bewegungsrichtung der Elektronen stark gekoppelt. Kurz darauf wurden tatsächlich die ersten topologischen Isolatoren entdeckt, darunter auch die drei bekannten binären Chalkogenide Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 und Sb_2Te_3 . Die Ursache für ihre besondere Eigenschaft ist ihre Bandstruktur, denn direkt an der Oberfläche verschwindet die sogenannte Bandlücke zwischen Leitungs- und Valenzband. Im Innern der binären Chalkogenide gibt es dagegen eine große Bandlücke, die die gebundenen Elektronen nicht überwinden können. Die Bandlücke beschreibt den Abstand zwischen den beiden Energiebändern, auf denen sich Elektronen bewegen können. Auf dem sogenannten Valenzband befinden sich die gebundenen Elektronen und auf dem Leitungsband die beweglichen Elektronen, die für den Stromfluss in einem Material sorgen. Ohne Bandlücke sind die Ladungsträger auch auf dem Valenzband ohne zusätzliche Energieaufnahme hochbeweglich und können so auf das Leitungsband überspringen und zum Stromfluss beitragen.



Spektrum einer Drittel-Atomlage Eisen auf Bismutselenid. Die sich kreuzenden Linien zeigen den Oberflächenzustand. Oberer und unterer Teil der Abbildung sind symmetrisch zueinander aufgrund der Zeitumkehrsymmetrie, die auch den Kreuzungspunkt schützt.

Große Bandlücke bei Raumtemperatur

Inzwischen sind topologische Isolatoren in vielen gängigen Materialien entdeckt worden, und zwar auch bei Raumtemperatur: Das bedeutet, dass die Bandlücke wirklich sehr groß ist, denn bei Raumtemperatur besitzen die Elektronen

DEUTSCH-RUSSISCHE FORSCHUNGSGRUPPE ZU TOPOLOGISCHEN ISOLATOREN

Im Dezember 2012 haben die Helmholtz-Gemeinschaft und die Russian Foundation for Basic Research eine neue „Helmholtz-Russia Joint Research Group“ gegründet. Ziel der gemeinsamen Forschungsgruppe ist die Untersuchung der neuen Materialklasse der topologischen Isolatoren, die interessante Anwendungen in der Computertechnologie verspricht. Dabei ist ein intensiver Austausch vorgesehen, von dem insbesondere der wissenschaftliche Nachwuchs profitieren soll. Die neue Forschungsgruppe, in der unter anderem HZB-Physiker Dr. Andrei Varykhalov und Chemikerin Prof. Dr. Lada V. Yashina von der Moskauer Staatsuniversität zusammenarbeiten werden, hat im Januar 2013 ihre Arbeit aufgenommen. Der Förderumfang beträgt bis zu 150.000 Euro pro Jahr über maximal drei Jahre.

schon allein aufgrund ihrer Wärmebewegung ausreichend Energie, um kleinere Bandlücken zu überwinden. Das bekannteste Material dieser Art ist Bismutselenid. Es wird von der Gruppe um Prof. Dr. Oliver Rader von der Abteilung Magnetisierungsdynamik des HZB untersucht und auch Markus Scholz hat für seine Doktorarbeit Bismutselenid mit Eisen beschichtet und anschließend den Oberflächenzustand der Proben vermessen. Gerade die Grenzflächen aus topologischem Isolator und einem ferromagnetischen Material wie Eisen wären für die Entwicklung neuer Speichermedien in der Computerindustrie interessant.

Allerdings mussten die Wissenschaftler bisher davon ausgehen, dass eine Beschichtung mit einem starken magnetischen Material den besonderen Oberflächenzustand zerstört, der topologische Isolatoren auszeichnet. Denn topologische Isolatoren verdanken die Stabilität ihrer Oberflächenzustände einem grundlegenden physikalischen Prinzip, der Zeitumkehrsymmetrie. Danach gelten physikalische Gesetze in gleicher Weise, auch wenn die Zeit rückwärts laufen würde. Auf die Bewegung von Elektronen in einem Festkörper angewandt heißt das, dass die Naturgesetze zum Tragen kommen, egal ob sich ein Elektron von links nach rechts oder – nach Zeitumkehr – von rechts nach links bewegt. Dabei gilt: Wenn ein Elektron in eine bestimmte Richtung läuft, zum Beispiel nach links, muss ihm ein Zustand mit nach oben gerichtetem Spin zur Verfügung stehen. Ein entgegengesetzt laufendes Elektron benötigt dann einen Zustand mit nach unten gerichtetem Spin. In den topologischen Isolatoren ist diese Kopplung von Bewegungsrichtung und Spin so stark, dass die Elektronen an der Oberfläche stets gezwungen sind, zur Leitung von elektrischem Strom zur Verfügung zu stehen. Die leitfähigen Oberflächenzustände sind dadurch geschützt.

Topologische Isolatoren auf dem Prüfstand

Anders verhält es sich in ferromagnetischen Materialien: Dort ist die Spinrichtung durch magnetischen Nord- und Südpol festgelegt. Die Zeitumkehrsymmetrie ist hier gebrochen. Bringt man beide Materialien – Ferromagneten und topologischen Isolator – in Kontakt, so sollte sich die Symmetriebrechung des Ferromagneten auf den topologischen Isolator übertragen. Er müsste, so die Annahme der Wissenschaftler, auch an seiner Oberfläche isolierend werden. Dann wäre die Entwicklung neuer Speichermedien mit topologischen Isolatoren eben doch nicht möglich.

„Nach der Entdeckung der topologischen Isolatoren herrschte zunächst große Euphorie“, sagt Markus Scholz: „Die Materialklasse war der große Hoffnungsträger in der Computertechnologie. Dann setzte sich die Annahme durch, dass ein topologisch geschützter Zustand – wie der Oberflächenzustand von Bismutselenid – extrem empfindlich auf magnetische Materialien reagieren soll – und das war eine große Enttäuschung.“ Denn für Anwendungen in Computerbauteilen wie neuen Speichermedien ist es von enormer

Bedeutung, dass der Oberflächenzustand auch in unmittelbarer Nähe eines magnetischen Materials stabil bleibt.

Weitere Forschungsanstrengungen notwendig

Um nun experimentell herauszufinden, wie es sich tatsächlich verhält, stellte Markus Scholz zunächst frische, saubere Bruchkanten des Kristalls Bismutselenid her – mit Hilfe von Klebeband, wie Scholz betont: „Bismutselenid ist aus struktureller Sicht eher zweidimensional. Das heißt, auf fünf Atomlagen, die sehr kräftig gebunden sind, folgt eine mit schwacher Bindung. Dort reißt der Kristall beim Abziehen des Klebebands ab.“ Die frische Bruchkante hat das Team dann hauchdünn mit Eisen überzogen. Anschließend untersuchten die Wissenschaftler die beschichtete Kristalloberfläche mit einer extrem oberflächenempfindlichen Messmethode, der winkelaufgelösten Photoemissionsspektroskopie (ARPES). „Damit können wir zwar nur ein bis zwei Atomlagen tief in die Probe schauen – sehen aber extrem genau, was dort gerade passiert“, so Dr. Jaime Sánchez-Barriga, Koautor der Studie.

Das Ergebnis war sehr überraschend und stellt nun die sorgfältige Argumentation in Frage, mit der bislang die Wechselwirkung von topologischen Isolatoren mit ferromagnetischen Grenzschichten beschrieben wurde. Denn Bismutselenid zeigt seine topologischen Oberflächenzustände auch nach der Beschichtung mit Eisen. „Damit sind neue Forschungsanstrengungen gerechtfertigt, Bismutselenid für Anwendungen in der Computerforschung weiter zu entwickeln“, sagt Sánchez-Barriga: „Denkbar sind beispielsweise magnetische Transistoren.“ Die HZB-Forscher treiben diese Forschung voran. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat nun ein Schwerpunktprogramm zu topologischen Isolatoren eingerichtet, das Oliver Rader koordiniert. hs

Phys. Rev. Lett. 108, 256810 (2012), (DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.256810): Tolerance of Topological Surface States towards Magnetic Moments: Fe on Bi₂Se₃, M. R. Scholz, J. Sánchez-Barriga, D. Marchenko, A. Varykhalov, A. Volykhov, L. V. Yashina and O. Rader

ZUSAMMENGEFASST

- Topologische Isolatoren leiten Strom an der Oberfläche extrem gut, im Inneren dagegen gar nicht.
- In Kombination mit einem ferromagnetischen Material wie Eisen ließen sich neue Datenspeicher bauen.
- Forscher des HZB haben experimentell den topologischen Isolator Bismutselenid mit Eisen überzogen und die Grenzschicht eingehend untersucht.
- Dabei fanden sie heraus, dass sich die Materialien wider Erwarten nicht negativ beeinflussen.

FORTSCHRITTE BEI BAUELEMENTEN AUS GRAPHEN

Physiker um Dr. Andrei Varykhalov und Prof. Dr. Oliver Rader haben an BESSY II Graphen untersucht. Dabei konnten sie zwei Phänomene aufklären und erste Etappenziele auf dem Weg zu Bauelementen aus Graphen erreichen. Diese könnten die Basis für eine neue Elektronik oder sogar **Spintronik** bilden.

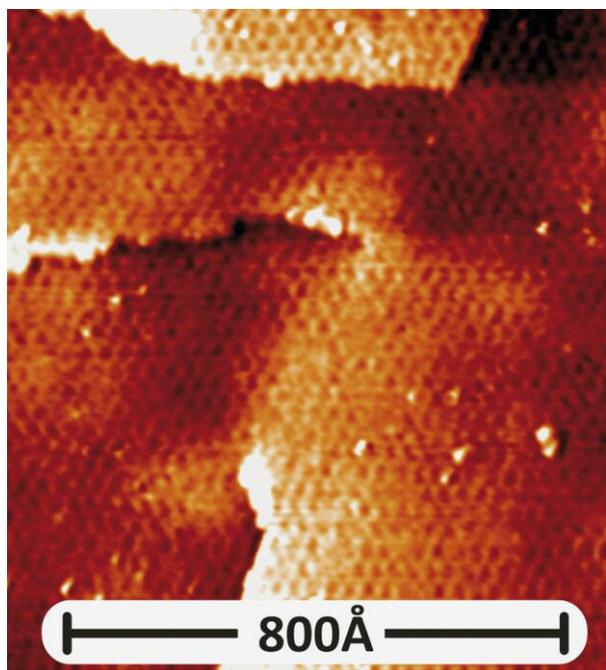
Kaum ein Element tritt in so vielfältiger Gestalt auf wie Kohlenstoff: Vom funkelnden und extrem harten Diamant bis zur profanen Kohle, vom weichen Graphit bis zu Nanoteilchen, die als Fußballmoleküle aus 60 oder 70 Kohlenstoffatomen oder als Kohlenstoff-Nanoröhrchen Furore machen. Mit Graphen gibt es nun sogar eine zweidimensionale Form. Wäre es möglich, frei schwebendes Graphen zu produzieren, dann müsste es erstaunliche Eigenschaften besitzen: Eine einzelne Graphenlage könnte das Gewicht einer Katze tragen.

Perfektes Graphen besteht aus nur einer einzigen Lage von Kohlenstoffatomen, die ein hexagonales Netz bilden. Dabei gehen die vierwertigen Kohlenstoffatome abwechselnd Doppel- und Einfachbindungen ein und bringen erstaunliche Eigenschaften hervor: Perfektes Graphen wäre extrem leitfähig, durchsichtig und belastbar. Forscher gehen davon aus, dass es viele heute verwendete Halbleitermaterialien ablösen könnte. Seine besondere Netzanordnung sorgt für die enorme Beweglichkeit der Ladungsträger in Graphen. Allerdings zeigen quantenchemische Berechnungen auch, dass dieses Netz thermodynamisch nicht stabil ist. Dennoch konnten Prof. André Geim und Prof. Konstantin Novoselov im Jahr 2004 tatsächlich Graphen nachweisen, wofür sie 2010 den Nobelpreis für Physik erhielten.

Graphen – kein normaler Halbleiter

Am interessantesten für die Physiker sind die elektronischen Eigenschaften von Graphen, die sich deutlich von denen normaler Halbleiter unterscheiden. Denn die Quantenphysik zeigt, dass in Halbleitern Elektronen nur bestimmte Energiewerte annehmen können. Dies führt zu zwei erlaubten Energiebändern, dem Valenzband für die gebundenen Elektronen und dem Leitungsband für die beweglichen Elektronen. Dazwischen gibt es eine sogenannte Bandlücke, die ein Elektron aus dem Valenzband entweder durch eine äußere Spannung oder durch Licht überqueren muss, um im Leitungsband zum Stromfluss beizutragen. Diese Bandstruktur ist die Grundlage für alle heutigen Halbleiter-Bauelemente.

Im zweidimensionalen Graphen unterscheidet sich die Bandstruktur jedoch erheblich. Leitungs- und Valenzband



Eine Aufnahme mit dem Rastertunnelmikroskop zeigt die Topografie von Graphen auf Gold. Durch Überlagerung der Goldstruktur und der sechseckigen Bienenwaben-Struktur des Graphens entsteht eine regelmäßige Überstruktur (Moiréstruktur), die zehnfach größer ist als die Maschen des Graphennetzes. Sie beeinflusst die chemische Wechselwirkung zwischen den beiden atomaren Schichten sowie die elektronischen Eigenschaften und das Verhalten der Spins.

sind hier wie zwei sogenannte Dirac-Kegel geformt, die sich mit ihren Spitzen berühren. Im Gegensatz zu normalen Halbleitern können sich im Graphen also auch Elektronen aus dem Valenzband ohne vorherige Energiezufuhr nahezu frei durch das Kristallgitter bewegen. Auch die optischen Eigenschaften sind anders als in konventionellen Halbleitern: Graphen lässt Licht in einem weiten Frequenzbereich fast ungehindert durch, es ist vollkommen transparent. Doch in Wirklichkeit gibt es kein perfektes Graphen. Winzige Flöckchen davon entstehen zwar schon, wenn man etwas Graphit von einem Bleistift zwischen Klebestreifen

bringt und diese auseinanderreißt, aber für größere Graphenschichten wird in der Regel Kohlenstoff unter Vakuum auf einer metallischen Trägerschicht aufgedampft. Dabei üben die Atome der Metallstruktur Kräfte auf die über ihnen liegenden Kohlenstoffatome aus, sodass aus dem eigentlich flachen Bienenwabennetz eine gewellte Berg- und Talandschaft wird.

Elektronen verhalten sich wie Licht

Die HZB-Physiker haben Graphen auf einer Nickelschicht untersucht. Denn Nickel besitzt eine ähnliche Gitterkonstante wie Graphen, sodass die Verzerrungen nur geringfügig sind. Sie untersuchten ihre Proben mit Hilfe der Photoelektronenspektroskopie bei BESSY II, um die elektronische Struktur zu bestimmen. Um ihre Messergebnisse zu interpretieren, arbeiteten sie mit theoretischen Physikern der Universitäten in Würzburg und Bremen und des Instituts für Struktur der Materie im norditalienischen Triest zusammen. Dabei konnten sie die „Dirac-Kegel“ nachweisen und zeigen, dass sich die Leitungselektronen sogar auf diesem Substrat eher wie Licht verhalten und weniger wie Teilchen. Dieses Verhalten hatten Physiker eigentlich nur für freischwebende Graphenschichten erwartet, die eine perfekte Bienenwabenstruktur aufweisen, nicht aber bei Graphen auf Nickel, das die perfekte hexagonale Symmetrie verzerrt. „Diese Ergebnisse sind überraschend“, sagt Andrei Varykhalov von der Abteilung Magnetisierungsdynamik am HZB. Der Grund liege in der Tatsache, dass die Nickel-Atome in zwei verschiedenen, sich kompensierenden Weisen mit den Kohlenstoff-Atomen des Graphen interagieren. Auf der einen Seite zerstören sie die perfekte hexagonale Symmetrie des Graphen-Gitters, auf der anderen Seite aber stellen sie zusätzliche Elektronen für die Graphen-Schicht zur Verfügung – was den Schaden wieder ausgleicht, der durch die Gitterverzerrung entstanden war. „Wir haben damit einen fundamentalen Mechanismus aufgedeckt, der für mögliche Anwendungen interessant ist“, erläutert Varykhalov. Weil Graphen in der Regel immer auf ein Trägersubstrat aufgebracht wird, könnten die „heilenden“ Extra-Elektronen zum Beispiel auch durch eine äußere elektrische Spannung eingespeist werden.

Gold-Atome verstärken die Spin-Bahn-Kopplung

In einer weiteren Untersuchung, diesmal mit Physikern aus dem Forschungszentrum Jülich, aus Harvard und aus der Staatlichen Universität in St. Petersburg, nahmen die HZB-Experten erneut Graphen auf Nickel unter die Lupe. Diesmal jedoch bedampften sie die Probe mit Goldatomen, die zwischen Graphen und Nickel krochen. An BESSY II beobachteten sie mit spinauflösender Photoemissionsspektroskopie, wie sich die Präsenz der Goldatome auf die sogenannte Spin-Bahn-Kopplung der Elektronen im Graphen auswirkt. Genau wie die Erde verfügen Elektronen über zwei Drehimpulse, den Bahndrehimpuls, der sie um den Atomkern

kreisen lässt, sowie den Spin, der einer Drehung um sich selbst entspricht. Diese beiden Drehimpulse beeinflussen sich gegenseitig über die Spin-Bahn-Kopplung. Je stärker diese Kopplung ausfällt, desto größer ist auch der Energieunterschied zwischen dem Zustand, in dem Spin- und Bahndrehimpuls miteinander ausgerichtet sind, und dem Zustand, in dem sie einander entgegen gerichtet sind. Bei leichten Kernen wie den Kohlenstoff-Atomen ist die Wechselwirkung zwischen Spin und Bahn eher schwach, bei schweren Atomen wie den Goldatomen dagegen sehr stark. Der Effekt war enorm und deutlich stärker als erwartet: „Wir konnten zeigen, dass die Goldatome über ihre Nähe zur Graphenschicht diese Wechselwirkung in der Graphenschicht um den Faktor 10.000 erhöhen“, berichtet Dmitry Marchenko, der die Messungen im Rahmen seiner Promotion durchgeführt hat. Diese sehr starke Spin-Bahn-Kopplung würde es ermöglichen, eine Art Schalter zu bauen, erklärt Varykhalov, denn nun könnte ein elektrisches Feld die Spins der Elektronen drehen. Zwei Spinfilter vor und hinter dem Bauelement würden jeweils nur Spins in einer Richtung durchlassen. Stünden die Spinfilter senkrecht zueinander, käme kein Elektron mehr durch, der Schalter wäre geschlossen. Ein elektrisches Feld würde die Spins jedoch drehen, sodass es den Schalter wieder teilweise oder sogar ganz aufdrehen könnte. Allerdings würde ein echter Schalter am Ende eine nicht leitfähige Unterlage erfordern, das metallische Nickelsubstrat müsste daher ersetzt werden. Als ideales Substrat dafür sehen die HZB-Forscher Siliziumkarbid an, mit dem sie nun experimentieren. arö

Nature Communications 3, (DOI: 10.1038/ncomms2227): Giant Rashba splitting in graphene due to hybridization with gold, D. Marchenko, A. Varykhalov, M.R. Scholz, G. Bihlmayer, E.I. Rashba, A. Rybkin, A.M. Shikin & O. Rader

Phys. Rev. X 2, 041017 (2012), (DOI: 10.1103/PhysRevX.2.041017): In-tact Dirac Cones at Broken Sublattice Symmetry: Photoemission Study of Graphene on Ni and Co, A. Varykhalov, D. Marchenko, J. Sánchez-Barriga, M. R. Scholz, B. Verberck, B. Trauzettel, T. O. Wehling, C. Carbon and O. Rader

ZUSAMMENGEFASST

- Graphen besteht aus Kohlenstoff und gilt als Material der Zukunft für den Bau von Halbleitern.
- Physiker des HZB haben Graphen auf einer Nickelschicht untersucht und konnten dabei ein idealtypisches Verhalten für Graphen nachweisen.
- In weiteren Experimenten wurde das Verhalten der Graphen-Elektronen näher untersucht. Dabei wurde ein elektrischer Effekt entdeckt, der sich für praktische Anwendungen nutzen lässt.

SCHLEICHENDE MATERIALERMÜDUNG MODELLIERT

Wissenschaftler des HZB haben **Kriechprozesse in festen Substanzen** in einem experimentellen Modellsystem untersucht und dessen Verhalten mit einem neuen theoretischen Modell beschrieben. Ihre Ergebnisse tragen dazu bei, Materialien besser zu verstehen und damit technische Unglücke wie Brückeneinstürze zu verhindern.

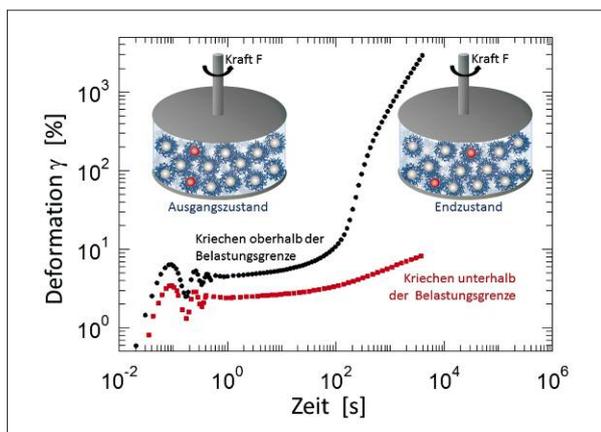
Tragisches Unglück im Paradies: Am 26. September 1996 stürzte im Pazifikstaat Palau der 240 Meter lange Bogen einer Spannbetonbrücke nach vorangegangenen Sanierungs- und Reparaturmaßnahmen ein. Zwei Menschen starben, vier wurden verletzt. Dabei hatten Experten die Brücke noch kurz vor der Wiedereröffnung als sicher eingestuft. Sie hatten aber sogenannte Kriechprozesse im Beton nicht bedacht. Unter stetiger Belastung verformt sich das Material, selbst wenn die wirkenden Kräfte weit unter der eigentlichen Belastungsgrenze liegen. Diese nicht-linearen Kriechprozesse in festen Substanzen haben Prof. Dr. Matthias Ballauff und Dr. Miriam Siebenbürger vom Institut für Weiche Materie und Funktionale Materialien am HZB näher untersucht. Dazu nutzten sie ein experimentelles Modellsystem, bestehend aus winzigen Partikeln (Kolloiden) in einer wässrigen Lösung. Als Modellpartikel kamen sphärische Kern-Schale-Kolloide zum Einsatz. Der 70 Nanometer große Kern besteht aus dem nicht wasserlöslichen Kunststoff Polystyrol, die rund 50 Nanometer dicke Schale aus vernetztem Poly(N-isopropylacrylamid). Der Vorteil dieser beschichteten Kolloide ist ihre Thermo-sensitivität: Da sich ihre Größe mit der Temperatur variieren

lässt, können unterschiedliche Packungsdichten untersucht werden. Für das Problem des Kriechens wurde eine so hohe Packungsdichte verwendet, dass ein ungeordneter Festkörper, ein sogenanntes Glas vorlag. In einem Messgerät zur Ermittlung des Verformungs- und Fließverhaltens von Materie, dem Rheometer, untersuchte Miriam Siebenbürger, wie sich dieses Glas bei verschiedenen Belastungen verhält. Die Resultate der Messungen zeigten ein komplexes Deformationsverhalten mit fünf verschiedenen Gesetzmäßigkeiten abhängig von der Zeit und der Stärke der Belastung.

Experiment und Theorie in sich stimmig

Die experimentellen Ergebnisse wurden mit einem neuen theoretischen Modell verglichen, das der Physiker Dr. Thomas Voigtmann (Universität Konstanz und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln) entwickelt hat. Das Modell der sogenannten Modenkopplungstheorie berechnet das Verhalten von harten Kugeln bei hoher Packungsdichte für verschiedene Belastungen. Die Theorie kann die experimentellen Daten trotz des komplexen zeitlichen Verhaltens gut beschreiben. Durch die Universalität der Theorie lässt sich nun Materialermüdung durch Kriechen allgemeingültig vorhersagen und auch auf andere Materialien, wie etwa Metalle, übertragen. Die Forscher hoffen darauf, dass ihr Ansatz bei der Entwicklung neuer Materialien, zum Beispiel im Fahrzeug- und Flugzeugbau, zur Anwendung kommt. In vielen Leichtmetall-Legierungen treten Kriechprozesse nämlich schon bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen auf.

Mit Neutronen aus der Berliner Neutronenquelle BER II will Miriam Siebenbürger in Zukunft ihre Proben noch besser verstehen. „Mit einem Rheometer kann man nicht direkt in das Material reinschauen. Das wollen wir jetzt ändern“, sagt die Forscherin. Dazu wird das Rheometer an der Beamline V16 eingebaut, um so auch die Strukturveränderung im sich verformenden Material zu erforschen.



Kriechprozesse in Materialien hängen stark von äußeren Bedingungen ab. Wissenschaftler des HZB konnten im Rheometer beobachten, wie sich Partikel (rot) in einem festen Material (blau) abhängig von Zeit und Belastung bewegen.

CS
Phys. Rev. Lett. 108, 255701 (2012), (DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.255701): Creep in Colloidal Glasses, M. Siebenbürger, M. Ballauff and T. Voigtmann

VERRÄTERISCHE ASYMMETRIE

Manche magnetischen Materialien können einen kollektiven Zustand annehmen, bei dem ihre atomaren Bausteine stark miteinander korrelieren. HZB-Forscher konnten dieses **exotische Phänomen** näher untersuchen.

Bei tiefen Temperaturen zeigen einige Substanzen seltsame Eigenschaften, die nicht zur alltäglichen Erfahrung passen. Beispiele dafür sind die Supraleitung, bei der kein elektrischer Widerstand mehr wirkt, sowie die Suprafluidität, die Flüssigkeiten Wände heraufkriechen lässt. Bei magnetischen Materialien gibt es ähnliche Effekte. So gehen manche Stoffe mit einer seltenen Struktur – die sogenannten Haldane-Ketten, Spin-Leitern oder eindimensionale Dimere-Ketten – beim Abkühlen in einen Zustand über, der die atomaren Elementarmagnete wie durch eine unsichtbare Kette aneinander fesselt. Physiker sprechen von einem kohärenten Verhalten. Nachweisen kann man es durch Beschuss mit Neutronen. Diese können das Teilchen-Kollektiv, die sogenannten Magnonen, anregen und dabei ein charakteristisches Anregungsspektrum erzeugen. Bei steigender Temperatur verändern sich die Anregungen: Sie werden breiter. Ihre Gestalt, die bei anderen Stoffen symmetrisch bleibt, erhält bei den exotischen Substanzen eine asymmetrische Form. „Die Linienverbreiterung ist eine Folge von Stößen zwischen den magnetischen Anregungen bei deren thermischer Bewegung“, erklärt Dr. Diana Quintero-Castro, Forscherin am HZB. Die Physiker sprechen von thermischer Dekohärenz. Die Stöße verkürzen die „Lebensdauer“ der angeregten magnetischen Zustände, was sich in einem „Zerfließen“ der Spektrallinie manifestiert. „Die Asymmetrie hingegen kommt durch die kollektive magnetische Anregung zustande, die wie eine abstoßende Kraft wirkt und sich gegen die Stöße stemmt.“

Dimer-System unter Neutronenbeschuss

Ein Team von Forschern des HZB und vom Institut für Festkörperphysik der TU Berlin um Prof. Dr. Bella Lake konnte gemeinsam mit Kollegen aus Frankreich und der Schweiz diesen Effekt erstmals auch an einem gewöhnlichen magnetischen Material nachweisen. Die Wissenschaftler nutzten dazu das hochauflösende Dreiachsen-Spektrometer FLEXX – eine Anlage zur Neutronenstreuung am HZB – sowie eine ähnliche Einrichtung am Paul-Scherrer-Institut im schweizerischen Villigen. Mit den Neutronen nahmen sie ein Dimer-System mit antiferromagnetischen Eigenschaften unter Beschuss. Dimere sind Konstrukte, die aus zwei weitgehend



Mit dem Dreiachsen-Spektrometer FLEXX konnten Wissenschaftler am HZB das magnetische Verhalten einer Chromverbindung näher analysieren.

identischen Untereinheiten bestehen, bei denen aber je nach deren Orientierung zueinander verschiedene magnetische Zustände möglich sind. Diese unterscheiden sich in ihrem Energiegehalt und magnetischen Verhalten. Das bei dieser Arbeit untersuchte Dimer-System bestand aus Strontium, Chrom und Sauerstoff und hat die Formel $\text{Sr}_3\text{Cr}_2\text{O}_3$. In diesem Stoff stehen viele, über ein breites Spektrum verteilte Energiezustände zur Verfügung. Bislang hatten die Physiker bei derlei Substanzen nicht erwartet, auf kollektive magnetische Anregungen zu treffen. Doch die Ergebnisse der Neutronenstreu-Experimente widerlegen das herkömmliche Bild. Um die Temperaturabhängigkeit der magnetischen Anregungen zu analysieren, bombardierten Bella Lake und ihre Forscherkollegen kristalline Proben der chromhaltigen Verbindung mit Neutronen in unterschiedlichen energetischen Zuständen und maßen das magnetische Anregungsspektrum bei Temperaturen zwischen 1,6 und 40 Kelvin. Dabei zeigte sich, dass die Linien mit zunehmender Temperatur, wie erwartet, schwächer und breiter wurden. Doch sie nahmen dabei auch eine zunehmend asymmetrische Form an. „Das belegt, dass in diesem Material eine starke magnetische Kraft wirkt, die die magnetisch angeregten Zustände kohärent aneinanderkoppelt“, sagt Diana Quintero-Castro. Der überraschende experimentelle Befund an dem für Physiker vergleichsweise allgemeinen magnetischen Material deutet darauf hin, dass dieses Phänomen bei weitaus mehr Materialien auftritt, als es die bislang gebräuchlichen Modelle erwarten ließen. Seltsame Eigenschaften scheinen im Mikrokosmos erstaunlich häufig zu sein. rb

Phys.Rev.Lett. 109, 127206 (2012), (DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.127206): Asymmetric Thermal Line Shape Broadening in a Gapped 3D Antiferromagnet, D. L. Quintero-Castro et al.

GITTERDYNAMIK IM RÖNTGENBLICK

Mit intensiven Laserpulsen haben Forscher am HZB die Atome eines kristallinen Materials zum Schwingen gebracht. Die Analyse dieser Bewegungen offenbart Details über **Struktur und Wechselwirkungen in Festkörpern**, die vielseitig genutzt werden können.

Die Analyse von Schwingungen in einem Kristallgitter kann viel über Struktur und Wechselwirkungen in einem Festkörper verraten. Dabei hilft ein quantenmechanisches Modell, das jede atomare Bewegung im Kristall als Überlagerung verschiedener Grundschwingungen beschreibt: sogenannte Phononen, die sich wie Wellen mit bestimmten Frequenzen und Amplituden verhalten. Für grundlegende physikalische Untersuchungen sowie die Entwicklung technischer Anwendungen – etwa in winzigen Sensoren, die auf der Messung von Vibrationen basieren –, sind Phononen mit einer möglichst einheitlichen und hohen Frequenz nötig. Diese lassen sich gezielt durch Anregung mit einer kurzen Abfolge von Laserpulsen erzeugen – das konnte eine Gruppe von Wissenschaftlern um Prof. Dr. Matias Bargheer, Leiter der Forschergruppe Ultraschnelle Dynamik am HZB sowie Professor am Institut für Physik und Astronomie der Universität Potsdam, nachweisen. Dazu beobachteten sie die Schwingungen der Atome mit höchster Orts- und Zeitaufösung direkt im Röntgenlicht. Für ihre Experimente am HZB verwendeten Bargheer und sein Team einen transparenten Kristall aus Strontium, Titan und Sauerstoff (SrTiO_3), der mit einer metallischen Schicht aus einer Strontium-Ruthenium-Verbindung (SrRuO_3) überzogen war. Diese Materialien werden als geeignete Kandidaten für eine künftige Mikro- und Nanoelektronik gehan-

delt. Die dünne metallische Schicht beschoss die Physiker mit zahlreichen extrem kurzen und intensiven Laserpulsen. „Der dünne Film diente dazu, die Energie der Laserblitze in intensive und hochfrequente Phononen zu verwandeln“, erklärt Bargheer. Diese Schwingungspakete wurden in den darunter liegenden Kristall übertragen, den sie in einem schnellen Rhythmus erbeben ließen.

Kristallgitter unter doppeltem Beschuss

Um die dynamischen Vorgänge im mikroskopischen Maßstab auszuloten, bestrahlten die Wissenschaftler die Probe mit Röntgenlicht der Synchrotronquelle ESRF in Grenoble. Auch dieses bombardierte den Kristall in Form ultrakurzer Pulse. „Beim Durchdringen des schwingenden Kristallgitters wurde ein Teil des Röntgenlichts an den Phononen gebeugt und veränderte dadurch Richtung und Frequenz“, erklärt Matias Bargheer. Durch eine spektrale Analyse der gebeugten Röntgenstrahlen ließen sich die Eigenschaften der Phononen präzise vermessen. Phononen bestimmter Frequenz führen im Röntgenspektrum zu einem charakteristischen Linienmuster.

Das Resultat der Röntgenbeugung: Die Laserpulse hatten in dem Festkörper Schwingungen mit fast einheitlicher Frequenz hervorgerufen, die den Kristall im Gleichtakt durchliefen. Durch Reibungseffekte klangen diese Vibrationen allmählich wieder ab – mit einer „Lebensdauer“ von rund 130 Pikosekunden (billionstel Sekunden), die sich aus den Messdaten ermitteln ließ. „Solche Werte verraten viel über die Vorgänge und Kräfte in dem untersuchten Festkörper“, sagt Bargheer – zumal sich durch Variieren der Frequenz der anregenden Laserpulse unterschiedliche Phononen generieren lassen. „Besonders spannend wird das in der Nähe von Phasenübergängen, die Materialien wie Strontiumtitanat bei bestimmten Temperaturen aufweisen“, meint der Forscher. „Die Dämpfung der Vibrationen nimmt bei minus 168 Grad Celsius plötzlich auf mehr als das Zehnfache zu, obwohl sich von außen betrachtet nichts am Material ändert.“ Bargheer betont: „Es sind kleinste Verschiebungen von Sauerstoff-Atomen im Kristallgitter, die hier die Musik machen.“



HZB-Forscher nutzen auch die European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble.

Auf der Basis eines physikalischen Modells berechneten die Forscher die zu erwartenden Eigenschaften der Phononen in Strontiumtitanat – und erhielten Werte, die sich gut mit den experimentellen Daten deckten. Die Messungen mithilfe der ultraschnellen Röntgenbeugung sind also eine exzellente Methode, um Einzelheiten über das Verhalten eines schwingenden Kristallgitters herauszufinden – und das nicht nur bei dem hier untersuchten Material, sondern auch bei vielen anderen kristallinen Stoffen. Und: Durch Röntgenlicht mit kürzeren Wellenlängen könnten sich künf-

tig noch detaillierter Einblicke in die komplizierte Dynamik von komplexen Festkörpern gewinnen lassen – etwa Materialien für Solarzellen, Supraleiter oder moderne energieeffiziente Nanoelektronik. *rb*

Appl. Phys Lett. 100, 094101 (2012), (<http://dx.doi.org/10.1063/1.3688492>): Detecting optically synthesized quasi-monochromatic sub-terahertz phonon wavepackets by ultrafast x-ray diffraction, M. Herzog, A. Bojahr, J. Goldshteyn, W. Leitenberger, I. Vrejoiu, D. Khakhulin, M. Wulff, R. Shayduk, P. Gaal & M. Bargheer

IM LABYRINTH DER MAGNETISCHEN DOMÄNEN

Ein internationales Forscherteam um Prof. Dr. Stefan Eisebitt hat bei der Untersuchung eines **ferromagnetischen Materials** einen Effekt entdeckt, der Datenspeicher kleiner und schneller machen könnte.

Die jederzeitige und schnelle Verfügbarkeit von Informationen ist eine der sichtbarsten und wesentlichsten Veränderungen der Lebenswelt von heute. Damit Laptops, Mobiltelefone und andere elektronische Geräte immer kleiner und leistungsfähiger werden können, sind Forscher weltweit auf der Suche nach den geeigneten Materialien für immer stärker miniaturisierte und schnellere Datenspeicher. Das gilt auch für Stefan Eisebitt vom Helmholtz-Zentrum Berlin und der TU Berlin, der seit langem an magnetischen Nanostrukturen forscht und viel zur Verbesserung der Untersuchungsmethoden in diesem Bereich beigetragen hat. Der schnellen Steuerung der Magnetisierung eines Materials kommt dabei eine Hauptrolle zu. Diesen Prozess haben Eisebitt und seine Kollegen an Proben aus einem Kobalt-Platin-Schichtsystem näher untersucht.

Laserlicht zerstört lokale Magnetisierung

„Dass sich durch Lichtpulse lokal die Magnetisierung eines Materials ändern lässt, ist schon lange bekannt, aber nun haben wir den Prozess sehr viel genauer beobachtet und dabei noch einen neuen Mechanismus entdeckt“, erklärt Eisebitt. Denn die meisten ferromagnetischen Materialien bestehen aus vielen einzelnen, magnetisch unterschiedlich ausgerichteten Domänen. „Beim Beschuss mit Laserlicht flitzen freigesetzte Elektronen durch das Material und gelangen aus einer Domäne in eine andersherum magnetisierte Domäne. Dabei tragen diese Elektronen einen Teil der Magnetisierung durch die Probe und können so die

lokale Magnetisierung zerstören“, erläutert Nachwuchswissenschaftler Bastian Pfau von der TU Berlin.

Zusammenspiel von BESSY II und FLASH

Die Experimente führten die Forscher der TU Berlin, des HZB und DESY sowie ihre Kollegen von den Universitäten Hamburg und Paris sowie sechs weiteren Forschungseinrichtungen, darunter auch dem Stanford Linear Accelerator Center SLAC (USA), an DESYs Freie-Elektronen-Laser FLASH in Hamburg durch. Zuvor hatten sie die Domänenmuster an den Synchrotronanlagen BESSY II am HZB und SOLEIL bei Paris charakterisiert. Sie untersuchten die Proben aus einem Kobalt-Platin-Schichtsystem, dessen nanometerfeine magnetische Domänen labyrinthische Strukturen bilden. „Unsere Ergebnisse zeigen auch, dass die Lage und Dichte magnetischer Domänengrenzen das Demagnetisierungsverhalten beeinflussen kann“, erklärt Stefan Eisebitt. „Das liefert einen neuen Ansatz, um schnellere und kleinere magnetische Datenspeicher zu entwickeln, nämlich durch den gezielten Aufbau magnetischer Nanostrukturen.“

arö

Nature Communications 3: 1100 (2012); (DOI 10.1038/ncomms2108): Ultrafast optical demagnetization manipulates nanoscale spin structure in domain walls, B. Pfau, S. Schaffert, L. Müller, C. Gutt, A. Al-Shemmary, F. Büttner, R. Delaunay, S. Düsterer, S. Flewett, R. Frömter, J. Geilhufe, E. Guehrs, C. M. Günther, R. Hawaldar, M. Hille, N. Jaouen, A. Kobs, K. Li, J. Mohanty, H. Redlin et al.

MASSGESCHNEIDERTE ORGANISCHE HALBLEITER

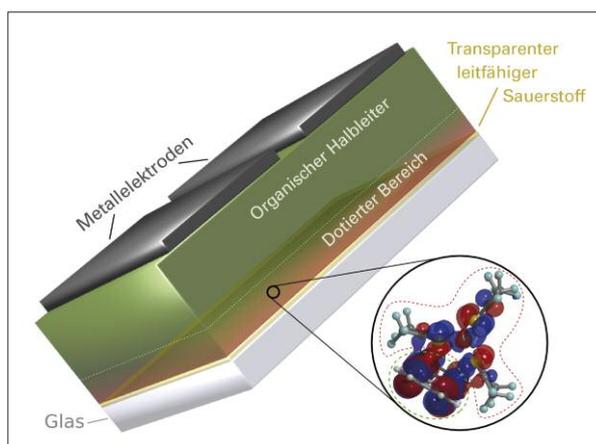
Durch **sogenanntes Dotieren** können die elektronischen Eigenschaften von organischen Halbleitern gezielt verändert werden. Was dabei genau geschieht, konnten Berliner Forscher nun experimentell zeigen.

Ultradünne Bildschirme zum Aufrollen; Wohnzimmerleuchten, die sich wie eine Tapete an die Wand kleben lassen; Solarzellen in Folienform, die auf Autos oder an Hausfassaden Energie aus dem Sonnenlicht gewinnen – mithilfe der organischen Elektronik lassen sich solche Visionen realisieren. Die aussichtsreiche Zukunftstechnologie basiert auf elektrisch leitfähigen Kunststoffen, aus denen sich ähnliche Produkte herstellen lassen wie aus dem bisher dominierenden Elektronik-Grundstoff Silizium – aber mit einfachen und kostengünstigen Herstellungsverfahren und in flexibler Gestalt.

Um ihre Materialeigenschaften an verschiedene Anwendungen anzupassen, lassen sich die organischen Substanzen – wie auch Silizium und andere anorganische Halbleiter – speziell präparieren: Der Kunststoff wird dazu „dotiert“. „Dazu werden gezielt Moleküle einer fremden chemischen Substanz in den Kunststoff eingebracht, um ihm neue oder verbesserte elektrische Eigenschaften zu verleihen – wie etwa eine höhere Leitfähigkeit durch frei bewegliche Elektronen“, erklärt Dr. Ingo Salzmann, der in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Norbert Koch am Institut für Physik der Berliner Humboldt-Universität forscht. Doch während das elektronische Dotieren bei konventionellen Halbleitern physikalisch gut verstanden ist, bereitet der zugrundeliegende Mechanismus bei der Plastik-Elektronik den Forschern noch Kopfzerbrechen.

Komplizierte Vorgänge beim Dotieren

„Man benötigt unerwartet große Mengen der Fremdstoffe, um eine Veränderung der Leitfähigkeit zu bewirken“, sagt Salzmann. Das ist teuer und führt zu unerwünschten Störungen im Material. Die Krux liegt im atomaren Inneren der Stoffe: Während bei Silizium die Variation der Materialmerkmale durch direktes Freisetzen einzelner Elektronen infolge des Dotierens zustande kommt, scheinen in organischen Substanzen komplizierte Prozesse am Werk zu sein. Ihnen kamen Salzmann und sein Humboldt-Forscherkollege Dr. Georg Heimel nun auf die Spur – durch Experimente in den Labors des HZB. Unterstützt wurden die beiden Forscher dabei von Dr. Alexander Schnegg vom HZB-Institut für Silizium-Photovoltaik.



Schema eines organischen elektronischen Bauteils mit Dotier-Molekülen (braune Einschlüsse) im aktiven Film (grün). Rechts die Vergrößerung eines molekularen Ladungstransfer-Komplexes und eines Hybrid-Orbitals.

Die Berliner Wissenschaftler rückten verschiedenen Kunststoffen mit unterschiedlichen Messmethoden zu Leibe. „Alle untersuchten Substanzen gehören zu einer relativ kompakten Klasse von organischen Materialien“, sagt Salzmann: Ihre Moleküle bestehen aus 20 bis 50 Kohlenstoff-Atomen sowie atomaren Bausteinen diverser anderer chemischer Elemente. Diese Substanzen dotierten die Forscher mit Fremd-Molekülen. Anschließend analysierten sie mithilfe von Photoelektronen-Spektroskopie, Röntgenstreuung und Elektronenspinresonanz-Messungen, was im Inneren des Materials geschah.

„Dadurch konnten wir feststellen, welche quantenmechanischen Energieniveaus sich in dem dotierten Material formten und wie viele frei bewegliche Elektronen darin existierten“, berichtet Salzmann. Mit diesem Wissen gelang es den Forschern, die molekularen Vorgänge beim Dotieren zu rekonstruieren. Das überraschende Resultat: Anders als etwa in Silizium, wechseln Elektronen nicht einfach vom Dotier-Molekül auf den zu dotierenden Kunststoff über. „Stattdessen entsteht ein zwischenmolekularer Komplex“, erklärt der Forscher – eine Art lose Verbindung aus einem Kunststoff- und einem Fremd-Molekül. „Die Komplexe müssen zunächst durch Energiezufuhr angeregt werden, damit bewegliche Ladungsträger entstehen können, die dann die Leitfähigkeit des organischen Materials steigern.“

Entsprechende Simulationsrechnungen bestätigten den experimentellen Befund.

Neue Funktionalitäten verwirklichen

Das Wissen um die molekularen Vorgänge, so hoffen die Berliner Forscher, wird helfen, zum Dotieren gezielt solche Substanzen zu verwenden, die möglichst effektiv zu den gewünschten Materialeigenschaften führen. Damit haben die Physiker den Ball zunächst zu ihren Kollegen aus der Chemie weitergespielt, die nun geeignete Verbindungen synthetisieren müssen.

„Auf dieser Basis werden wir in der Lage sein, Produkte der organischen Elektronik billiger und mit besseren Eigenschaften herzustellen“, sagt Ingo Salzmann. „Und vermutlich werden ganz neue Funktionalitäten möglich sein, die sich bisher nicht verwirklichen lassen.“ *rb*

Phys. Rev. Lett. 108, 035502 (2012), (DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.035502); Intermolecular Hybridization governs Molecular Electrical Doping, I. Salzmann, G. Heimel, S. Duhm, M. Oehzelt, P. Pingel, B.M. George, A. Schnegg, K. Lips, R.-P. Blum, A. Vollmer & N. Koch

WASSER ALS TÜRÖFFNER

HZB-Forscher um Prof. Dzubiella haben in einer Untersuchung nachgewiesen, dass Wasser beim Transport von **pharmazeutischen Wirkstoffen** mehr als nur ein Lösungsmittel ist.

Ohne Wasser gibt es kein Leben auf der Erde. Fast alle biologischen Prozesse in den Zellen von Lebewesen und Pflanzen funktionieren nur in wässriger Lösung. Dabei wandern in der Regel kleine Moleküle, die sogenannten Liganden, wie „Schlüssel“ in die passenden „Schlösser“, die sie in größeren Eiweißmolekülen finden und docken dort an. Dieser Vorgang löst dann Signale oder auch die Produktion von Stoffen aus. Welche Rolle das Wasser bei solchen Prozessen genau spielt, war bisher unklar. Ist es nur ein passives Transportmedium oder hat es noch andere Funktionen?

Diese Frage haben Physiker um Prof. Dr. Joachim Dzubiella vom Institut Weiche Materie und Funktionale Materialien des HZB und der HU Berlin mit Hilfe von Computersimulationen für ein Modellsystem untersucht: Dabei zeigte sich, dass Wasser durch subtile Wechselwirkungen mit der Geometrie und den Oberflächen der Moleküle die An-

bindungsgeschwindigkeit aktiv beeinflussen kann. Diese Erkenntnis ist neu und könnte für die gezielte Entwicklung von pharmazeutischen Wirkstoffen interessant sein.

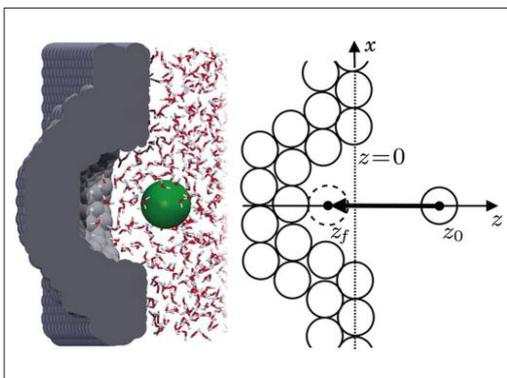
Wasserbewegung beeinflusst Liganden

Zusammen mit Kollegen der TU München, der UC San Diego und der University of Utah hat Dzubiella modelliert, wie ein kleines Ligandenmolekül in einer Art Tasche in einem Protein andockt und die Bewegungen und Kräfte bei diesem Prozess berechnet. Dabei ging das Team davon aus, dass die Oberfläche der Proteintasche hydrophob war. „Natürlich dringen auch immer wieder einige Wassermoleküle in die Proteintasche ein“, berichtet Dzubiella. „Aber sie werden von der hydrophoben Oberfläche abgestoßen und erzeugen so eine kleine Welle, die wiederum die Ligandenmoleküle in der Nähe ergreift.“ Dabei bestimmt die Geometrie der Proteintasche, wie heftig diese Wasserfluktuationen ausfallen und ob sie die Ligandenmoleküle in der Nähe eher bremsen oder sogar beschleunigen.

„Wenn wir Wirkstoffe entwickeln wollen, die gezielt an bestimmten Molekülen in den Zellen andocken und dort Prozesse auslösen oder verhindern sollen, dann müssen wir den Prozess viel genauer als bisher verstehen“, erklärt Dzubiella. Die ersten Anhaltspunkte hat er mit seiner Arbeit auf jeden Fall schon geliefert. *arö*

Proc. Natl. Acad. Sci. USA (DOI: 10.1073/pnas.1221231110): Solvent fluctuations in hydrophobic cavity–ligand binding kinetics, P. Setny, R. Baron, P. M. Kekenus-Huskey, J. A. McCammon and J. Dzubiella

In einer Computersimulation wurden die Bewegungen und Kräfte zwischen Wassermolekülen (rot-weiß), runden Liganden (grün) und einer wasserabstoßenden Hohlform in einem Proteinmolekül berechnet.



POLYZUCKER MACHT GELENKE STABILIER

HZB-Wissenschaftler um Dr. Roland Steitz haben mit Neutronen das Verhalten einer Grenzschicht untersucht, wie sie in den Gelenken von Säugetieren vorkommt. Ihre Ergebnisse könnten zur **Verbesserung von Prothesen** beitragen.

Die Gelenke von Menschen und Tieren sind komplexe Gebilde. Am Ende der Knochen, die durch ein Gelenk verbunden werden, befindet sich eine Knorpelschicht, auf der jeweils eine aus wenigen Membranen aufgebaute, abschließende Lipidschicht liegt. Um das Gelenk herum liegt die mit Gelenkflüssigkeit (Synovia) ausgefüllte Gelenkkapsel. Die Gelenkflüssigkeit, die für die notwendige Schmierung des Gelenks sorgt, besteht größtenteils aus Wasser, enthält aber auch Hyaluronsäure, einen Polyzucker. Wie die Schmierung im Gelenk an der Grenzschicht von Lipidschicht und Gelenkflüssigkeit auf molekularer Ebene funktioniert, ist Wissenschaftlern bislang ein Rätsel – an dessen Lösung wird am HZB gearbeitet.

Für ihre Untersuchung mit dem Neutronenreflektometer an BER II überzogen Roland Steitz und seine Kollegen Silizium anstelle eines Knochens mit einer Lipidschicht und verwendeten schweres Wasser D_2O als Gelenkflüssigkeit. Schon bei einer leichten Erhöhung der Temperatur auf 26 Grad Celsius stellten sie fest, dass sich die Lipidschicht ablöst – ein Vorgang, der in einem echten Gelenk schmerzhaft Folgen hätte. „Im zweiten Versuchsaufbau untersuchten wir

das Zusammenspiel von Hyaluronsäure in schwerem Wasser und der Lipidschicht. Aus der Grenzschicht bildet sich dann ein sogenanntes Hydrogel, das man sich wie einen Schwamm vorstellen kann. Dabei quillt die Lipidschicht um das Vierfache ihrer ursprünglichen Dicke auf und wird zusätzlich durch die eingebaute Hyaluronsäure vernetzt. Das Hydrogel bildet so einen Puffer, der Knorpel und Knochen schützt“, erläutert Steitz. Darüber hinaus bleibt die gequollene Lipidschicht auch bei einer Temperaturerhöhung stabil. In weiteren Versuchen soll nun das Verhalten der Grenzschicht bei hydrostatischem Druck untersucht werden, wie er bei Bewegungsabläufen in einem Gelenk vorkommt. Die Ergebnisse könnten dabei helfen, künftig die Beschichtung von Gelenken in Prothesen zu verbessern, damit diese abriebfrei und langfristig stabil bleiben.

cn

Biochimica et Biophysica Acta 1818 (2012) 2648–2659 (DOI: 10.1016/j.bbame.2012.05.022): Impact of a model synovial fluid on supported lipid membranes, M. Kreuzer, M. Strobl, M. Reinhardt, M.C. Hemmer, T. Hauß, R. Dahint, R. Steitz

PING-PONG SORGT FÜR ORDNUNG

Ein Forscherteam um Dr. Dimitri Argyriou hat am HZB bei Untersuchungen an einem Kristall die Ursache für seine stabile Struktur gefunden.

Als ein internationales Forscherteam am HZB einer kristallinen Verbindung aus Terbium, Eisen und Sauerstoff durch Neutronenbeugung zu Leibe rückte, machte es eine erstaunliche Entdeckung: Bei Temperaturen von etwa drei Kelvin und in einem äußeren Magnetfeld offenbarte die Beugung an dem Material mit der chemischen Formel $TbFeO_3$ eine ungewöhnlich Struktur. Die Experimente deuten darauf hin, dass sich der Kristall nahe dem absoluten Nullpunkt in geordnete magnetische Bereiche teilt, sogenannte Domänen. Der Abstand zwischen deren Wänden

beträgt rund 170 Ångström (10^{-10} Meter). Berechnungen der Forscher deuten darauf hin, dass die Bereichsgrenzen durch Prozesse auf Distanz gehalten werden, die den Wechselwirkungen in Atomkernen ähneln – den Yukawa-Kräften zwischen Protonen und Neutronen. Diese nach dem japanischen Physiker Yukawa Hideki benannten Kräfte werden durch Pionen vermittelt, exotische Partikel. Deren Rolle übernehmen im $TbFeO_3$ -Kristall sogenannte Magnonen, das sind angeregte Magnet-Zustände der Terbium-Spins. Sie werden in einer Art magnetischem Ping-Pong zwischen den Domänen-Wänden ausgetauscht, erzeugen so eine Abstoßung – und sorgen dafür, dass die Struktur stabil bleibt.

rb

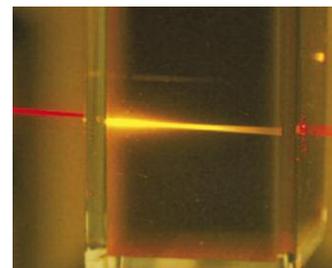
Nature Materials 11 (DOI: 10.1038/nmat3358): Solitonic lattice and Yukawa forces in the rare-earth orthoferrite $TbFeO_3$, S. Artyukhin et al.

TURBO FÜR SOLARZELLEN

Ein internationales Forscherteam hat in Laborversuchen an Solarzellen gezeigt, wie **Energieverluste** bei der Umwandlung von Licht in Strom vermieden werden können.

Moderne Silizium-Solarzellen haben einen maximalen Wirkungsgrad von etwa 25 Prozent. Weltweit liefern sich Forscher ein Rennen, diesen Wirkungsgrad immer weiter zu erhöhen. Eine natürliche Grenze liegt jedoch bei etwa 30 Prozent, weil Solarzellen aufgrund physikalischer Gesetze Licht mit Energien unterhalb einer materialspezifischen Grenze nicht absorbieren können. Die Energie dieses Lichts geht damit verloren. Wissenschaftler der Universität Sydney und des HZB haben mit der sogenannten photochemischen Hochkonversion eine Lösung für das Problem gefunden: Zwei energiearme Photonen, die eigentlich in der Solarzelle wirkungslos bleiben, werden dabei zu einem energiereichen Photon gebündelt, das anschließend einen Beitrag zur Stromgewinnung leisten kann. „Noch ist die erreichte Steigerung in der Effizienz der Solarzelle gering, aber der Weg zu weiterer Verbesserung ist klar erkennbar“, sagt Projektleiter Prof. Dr. Klaus Lips vom HZB-Institut für Sili-

zium-Photovoltaik. „Die Konzepte hierfür werden in enger Kooperation zwischen Sydney und dem HZB erarbeitet.“ Der wesentliche Vorteil gegenüber anderen Ansätzen liegt darin, dass die Solarzelle nicht aufwendig neu entwickelt werden muss, sondern im Prinzip das bloße Hinzufügen des Hochkonverters ausreicht, um die Effizienz zu erhöhen. „Genauso wie man in ein Auto einen Turbo einbaut, um es schneller zu machen“, erklärt Klaus Lips.



Rotes Licht eines Laserpointers wird beim Durchgang durch die Flüssigkeit des photochemischen Hochkonverters in energiereiches gelbes Licht umgewandelt.

Proc. Natl. Acad. Sci. USA (DOI: 10.1073/pnas.1221231110): Solvent fluctuations in hydrophobic cavity–ligand binding kinetics, P. Setny, R. Baron, P. M. Kekenus-Huskey, J. A. McCammon and J. Dzubiella

RÄTSELHAFTE STREIFENSTRUKTUR

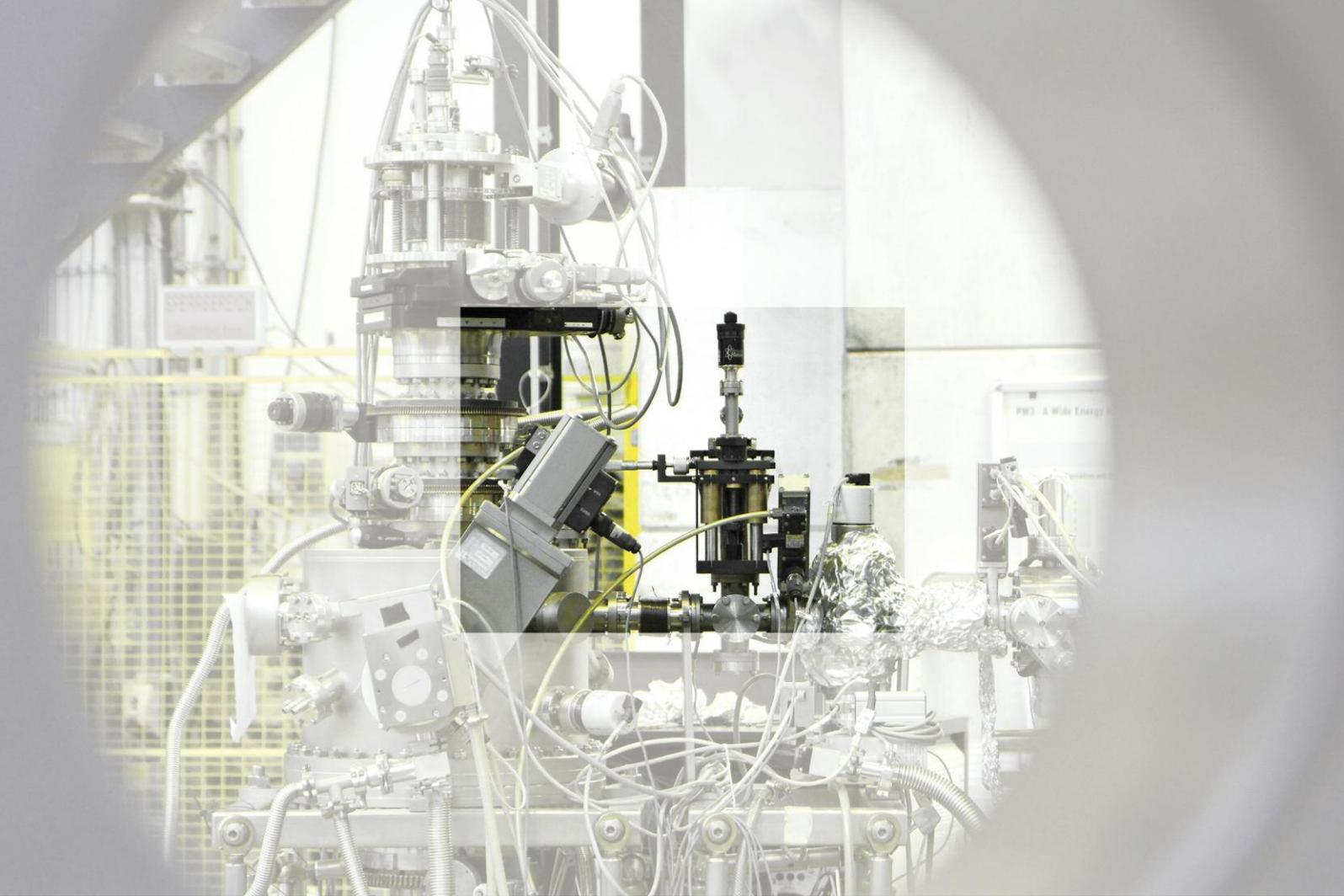
Wissenschaftler um Dr. Christian Schüßler-Langeheine haben eine rätselhaft verschwindende Streifenstruktur in Supraleitern entdeckt. Sie könnte der Schlüssel zu maßgeschneiderten Supraleitern sein.

Supraleiter sind Stoffe, die unterhalb einer charakteristischen Sprungtemperatur jeden elektrischen Widerstand verlieren und Strom vollkommen verlustfrei leiten. Die Sprungtemperatur liegt allerdings meist nahe dem absoluten Gefrierpunkt, wodurch praktische Anwendungen erschwert werden. Aus der Kupferverbindung Lanthan-Cuprat lässt sich durch das gezielte Einschleusen verschiedener Metalle wie etwa Barium oder Strontium ein sogenannter Hochtemperatur-Supraleiter mit unterschiedlichen Eigenschaften herstellen, der schon deutlich über dem absoluten Gefrierpunkt jeden elektrischen

Widerstand verliert. Warum die Verbindung supraleitend wird, wissen die Forscher aber nicht genau.

HZB-Wissenschaftler Dr. Christian Schüßler-Langeheine konnte bei Untersuchungen mit Röntgenstrahlen und Neutronen zeigen, dass sich bei Lanthan-Strontium-Cuprat nach dem Einfügen (Dotieren) mit Metallen eine magnetische und elektrische Streifenstruktur ausbildet, die sich auch bei anderen Supraleitern findet. Elektrisch geladene, nicht-magnetische Kupferionen ordnen sich dabei zu regelmäßigen Streifen an. Die Forscher nehmen an, dass diese Streifen die Supraleitung behindern. Die weitere Untersuchung zeigte jedoch, dass die Struktur ab einer bestimmten Materialtiefe verschwindet. Warum das so ist, ist noch ungeklärt. Die Physiker hoffen nun, dass sich mit den Informationen aus dem Lanthan-Strontium-Cuprat die allgemeine Bedeutung der Ladungstreifen für die Supraleitung entschlüsseln lässt.

Nature Communications (DOI 10.1038/ncomms2019): Charge stripe order near the surface of 12 percent-doped La₂-xSr_xCuO₄, Wu et al.



KOOPERATIONEN

Der Bereich „Funktionale Materialien“ des Helmholtz-Zentrums Berlin unter der Leitung von Prof. Dr. Matthias Ballauff beteiligt sich seit November 2012 an der **Graduiertenschule „SALSA – School of Analytical Sciences Adlershof“** der Humboldt-Universität zu Berlin und wird zukünftig einen Promovierenden im Rahmen dieses Programms betreuen. Die von Bund und Ländern geförderte Graduiertenschule der Exzellenzinitiative „SALSA“ schrieb im November die ersten 15 Promotionsstipendien aus, für die sich Bewerber bis Mitte Dezember 2012 anmelden konnten.

Das 2010 vom HZB, der Freien Universität Berlin, der Humboldt-Universität Berlin, dem Max-Delbrück Centrum sowie dem Forschungszentrum für Molekulare Pharmakologie

gegründete **Joint Berlin MX-Laboratory** am Elektronenspeicherring BESSY II wird seine Arbeit mindestens für fünf weitere Jahre bis Ende 2017 fortsetzen. Im Rahmen der Kooperation stellt das HZB dem gemeinsamen Labor für Kristallographie zwei seiner drei Kristallographie-Messplätze mit drei Experimentierplätzen zur Verfügung.

Das HZB und das **Indira Gandhi Centre for Atomic Research (IGCAR)** im südostindischen Kalpakkam haben 2012 einen Vertrag über die gemeinsame Doktorandenausbildung geschlossen. Ziel ist es, indischen Doktoranden des Forschungszentrums einen Aufenthalt am HZB von mindestens einem Jahr zu ermöglichen. Einen ähnlichen Vertrag hat das HZB seit 2010 auch mit dem Bhabha Atomic Research Centre (BARC) in der Nähe von Mumbai.

LANGFRISTIGE PERSPEKTIVE

Die Charité Berlin und das HZB setzen ihre Zusammenarbeit bei der **Augentumor-Therapie** unbefristet fort. 2012 wurde der zweitausendste Patient mit der Protonentherapie behandelt.

Seit 1998 behandeln die Charité Berlin und das HZB Patienten, die an einem Augentumor erkrankt sind, mit Protonenstrahlen. 2007 hat die Charité die Federführung für diese spezielle Therapie übernommen, die für Patienten erhebliche Vorteile mit sich bringt. Deshalb wurde der Vertrag zur Fortsetzung der Protonentherapie und zum Betrieb der dazu notwendigen Beschleunigeranlage Ende 2011 von beiden Seiten mit unbegrenzter Laufzeit verlängert. Damit besteht für die 500 bis 600 betroffenen Menschen, die jährlich in Deutschland an einem malignen Aderhautmelanom erkranken, weiterhin Hoffnung auf eine erfolgreiche Behandlung. In mehr als 97 Prozent der Fälle lässt sich der Tumor durch die Protonentherapie vollkommen zerstören. Meistens wird damit nicht nur das Auge, sondern auch die Sehkraft in einem befriedigenden Maß erhalten.

Die Behandlung des zweitausendsten Patienten am HZB-Standort Berlin-Wannsee würdigten HZB und Charité am 11. Oktober 2012 mit einem Festkolloquium. „Die hohe Qualität sowohl des Protonenstrahls als auch der medizinischen Betreuung sind wichtig für den Erfolg der Therapie. HZB und Charité sind mit dieser Partnerschaft vorbildlich in Deutschland“, sagte die Senatorin für Wirtschaft, Technologie und Forschung, Cornelia Yzer. „Wir freuen uns, dass das



V.l.n.r.: Martin Jermann, Prof. Dr.-Ing. Anke Kaysser-Pyzalla, Cornelia Yzer, Prof. Dr. Ulrich Frei, Prof. Dr. med. Antonia M. Jousseen und Dr. Jutta Koch-Unterseher.

HZB diesen Beitrag zur erfolgreichen Strahlentherapie leisten kann“, betonte Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla, wissenschaftliche Geschäftsführerin des HZB. „Es ist eine große wissenschaftliche Herausforderung, die Beschleunigertechnologie und die Positioniergenauigkeit zum Wohle der Patienten immer weiter zu verbessern.“ Dies ist eine der Aufgaben der HZB-Abteilung Protonentherapie, die von Dr. Andrea Denker geleitet wird. Sie wird auch künftig dafür sorgen, dass in der Anlage ein Protonenstrahl erzeugt wird, der optimal an die Bedürfnisse der Therapie angepasst ist. *cn*

MIT SCALENANO ZU MEHR EFFIZIENZ

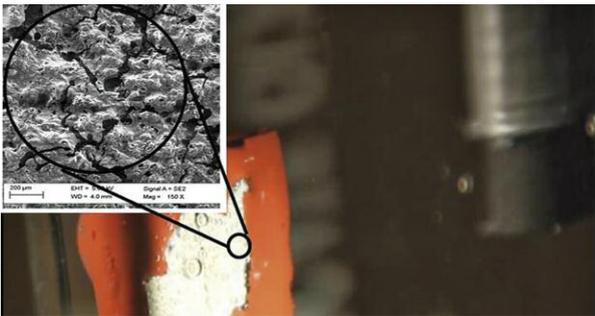
Die Europäische Union fördert das Dünnschicht-Solarzellen-Projekt „Scaleno“, an dem 13 europäische Forschungsgruppen, darunter auch des HZB und der FU Berlin, beteiligt sind. Bis 2015 wurden Mittel in Höhe von mehr als zehn Millionen Euro für die Weiterentwicklung der Chalkogenid-Solarzellentechnologie bewilligt. Unter den Chalkogeniden ist Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGSe) das Material, das den gegenwärtig höchsten Wirkungsgrad erreicht. Bisher wird die Verbindung überwiegend mit einer vakuumbasierten Beschichtungstechnik in mikrometerdünnen Schichten auf Glas oder Folie aufgebracht. Ein Ziel des Projekts ist es, neue umweltfreundliche und günstigere Produktionstechniken zu

entwickeln, die ohne Vakuum auskommen. Das HZB-Team um Dr. Thomas Unold soll dabei unter anderem an der Qualitätskontrolle und Prozessüberwachung arbeiten. Hierfür entwickeln die Forscher neuartige analytische Methoden zur Charakterisierung der Solarzellen während des Herstellungsprozesses.

In der neuen Forschungsstrategie sollen auch Dünnschicht-Absorbermaterialien mit nanostrukturierten sogenannten transparenten leitfähigen Oxiden (TCO) kombiniert werden. Zu diesem Schwerpunkt arbeitet das Team von Prof. Martha Lux-Steiner und Dr. Sophie Gledhill von der Freien Universität Berlin und dem HZB an der Anpassung, Optimierung und optischen Modellierung von Chalkogenid-Solarzellen, die zusätzlich Zinkoxid-Nano-Arrays enthalten. *cn*

SONNENLICHT ZU WASSERSTOFF

Wissenschaftler des HZB haben im Rahmen des Verbundprojekts „**Light2Hydrogen**“ ein neues Hybridmaterial für die Wasserstoffproduktion getestet.



Graphitische Kohlenstoffnitrid-Filme, die auf p-Typ-CuGaSe₂-Dünnschichten abgelagert sind, können erfolgreich als photoelektrochemische Bestandteile von Photokathoden zur Wasserstoffproduktion aus Sonnenlicht genutzt werden.

Sonnenlicht zur Produktion von Wasserstoff nutzen zu können, wäre die ideale Lösung, um Sonnenenergie zu speichern. Für den Herstellungsprozess – die photochemische Elektrolyse oder photoelektrochemische Wasserstoffentwicklung durch Aufspaltung von Wasser in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff – gibt es bisher aber keine ausgereiften Materialsysteme. Notwendig sind Halbleiter, die in Wasser eingetaucht Licht absorbieren und es nutzen, um Ladungsträger für die Photoelektrolyse an die Materialoberfläche zu bringen. Die idealen Halbleiter wären natürlich Silizium oder Chalkopyrit, so wie sie in der Photovoltaik benutzt werden. Taucht man aber Silizium- bzw. Chalkopyrit-Halbleiter in Wasser, korrodieren sie sofort und werden unwirksam.

NEUE MATERIALIEN FÜR DIE PHOTOVOLTAIK

Die Helmholtz-Gemeinschaft fördert mit drei neuen Energie-Allianzen die Forschung im Bereich Erneuerbare Energien. Das Helmholtz-Zentrum Berlin ist an einer davon beteiligt.

Das HZB und das Forschungszentrum Jülich bilden zusammen mit der Humboldt Universität Berlin, der Universität Potsdam und der Freien Universität Berlin eine der drei Energie-Allianzen, die 2012 von der Helmholtz-Gemeinschaft ins Leben gerufen wurden. Ziel der Energie-Allianz mit dem Namen „Anorganisch/organische Hybrid-Solarzellen und -Techniken für die Photovoltaik“ ist es, die Forschung an Materialien im Bereich der Energieversorgung gezielt voranzutreiben. Die Vorhaben werden für drei Jahre gefördert, wobei eine Fortsetzung der Forschung auch über die drei Jahre hinaus geplant ist. Im Zentrum steht die Verknüpfung von anorganischen Halbleitern wie Silizium, Kupfer-Indium-Sulfid/Selenid oder Gallium-Arsenid-Verbindungen mit organischen Materialien, die ebenfalls in der Lage sind, Sonnenlicht in elektrische Energie umzuwandeln. Jede Materialklasse hat jedoch ihre Nachteile. So sind die Herstellungskosten

bei anorganischen Halbleitern relativ hoch, organische Solarzellen aus kleinen Molekülen oder Polymeren wiederum haben relativ niedrige Wirkungsgrade. Die Kombination von anorganischen und organischen Materialien in sogenannten Hybrid-Solarzellen könnte diese Probleme lösen.

Solarzell-Anordnungen verbessern

Diesem neuen Forschungsansatz widmet sich die Helmholtz-Energie-Allianz der Berliner, Potsdamer und Jülicher Partner. Sie bündelt die Expertise, die zu diesen zwei ganz unterschiedlichen Materialklassen in den beteiligten Einrichtungen vorhanden ist. Im Mittelpunkt der Forschung stehen Prozesse, die an den Grenzflächen zwischen anorganischen Halbleitern und organischen Materialien bislang noch die effektive Stromerzeugung in der Solarzelle begrenzen. Um die Effektivität solcher Solarzell-Anordnungen zu verbessern, setzen die Forscher unter anderem auf Nanostrukturen. So sollen anorganische Nanopartikel und Nanodrähte in organische Materialien eingebracht werden, wobei zugleich auf eine kostengünstige Fertigung solcher Syntheseverfahren geachtet wird. Vielversprechend ist außerdem die Einbettung organischer Halbleiter zwischen anorganische Nanosäulen.

cn

Forscher suchen deshalb nach anderen Halbleitern – wie dem polymeren Kohlenstoffnitrid. Bisher konnte diese Substanz nur in Pulverform untersucht werden. Im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Light2Hydrogen“ haben Wissenschaftler das polymere Kohlenstoffnitrid erstmals erfolgreich auf Chalkopyrit und Silizium aufgebracht und getestet. Dabei konnten sie nachweisen, dass Kohlenstoffnitridfilme auf Chalkopyriten und Silizium erfolgreich als Bestandteil von Photokathoden für die lichtinduzierte Wasserstoff-Entwicklung eingesetzt werden können. „Wenn wir mit unserer Grundlagenforschung einen Beitrag zur Entwicklung neuer Energieversorgungskonzepte leisten

wollen, müssen wir die Prozesse so weiter entwickeln, dass sie später auch industriell anwendbar sind“, erklärt PD Dr. Thomas Schedel-Niedrig, der das Projekt am HZB leitet. Die Aussichten dafür sind gut: Das HZB ist 2012 als Projektpartner in das DFG-Schwerpunktprogramm „Regenerativ erzeugte Brennstoffe durch lichtgetriebene Wasserspaltung: Aufklärung der Elementarprozesse und Umsetzungsperspektiven auf technologische Konzepte (SPP 1613)“ aufgenommen worden. Ziel des Programms ist es, Sonnenlicht effizient für die Wasserstoffproduktion an Chalkopyriten und Chalkopyrit-Solarzellen sowie für die Sauerstoffproduktion an Tantaloxinitriden nutzbar zu machen. *cn*

VOLLBETRIEB AUF KLEINEN MODULEN

Das Kompetenzzentrum Dünnschicht- und Nanotechnologie für Photovoltaik Berlin (PVcomB) hat zwei Anlagen zur Herstellung von **Dünnschicht-Solarmodulen** in Betrieb genommen.

Das PVcomB – eine Initiative des Helmholtz-Zentrums Berlin für Materialien und Energie und der Technischen Universität Berlin – hat seine beiden Forschungslinien für Dünnschicht-Silizium- und Kupfer-Gallium-Indium-Selenid (CIGS)-Solarmodule weiter verbessert. 2012 nahm es gemeinsam mit dem Kooperationspartner Leybold Optics GmbH den vollen Betrieb mit Modulgrößen von 30 mal 30 Zentimetern auf zwei sogenannten Inline-Sputter-Anlagen auf. „Die Dünnschicht-Technologie wird im Labor immer weiter entwickelt, sie muss schnellstmöglich industriell umgesetzt werden können“, fasst Dr. Rutger Schlatmann, Leiter des PVcomB, die Aufgabe des Kompetenzzentrums zusammen. An zwei industrienahen Forschungslinien arbeiten Wissenschaftler und Techniker, um Fragestellungen aus der industriellen Fertigung zu lösen. Gleichzeitig werden Alternativen aus der Grundlagenforschung weiterentwickelt und getestet.

Von der Forschung rasch in die Industrie

Mit der Inbetriebnahme der Sputter-Anlagen von Leybold Optics ist das Kompetenzzentrum in der Lage, die gesamte Modulherstellung – ausgehend vom Reinigen der Gläser bis hin zum Verkapseln der Module – auf einer Glasgröße von 30 mal 30 Zentimetern durchzuführen. In der Referenzlinie für Dünnschicht-Silizium verfügt das PVcomB mit einer der beiden Sputteranlagen nun über die Möglichkeit, eigene Schichten für Front- und Rückkontaktsysteme herzustellen. Die zweite Anlage ermöglicht in der Referenz-



Dr. Bernd Stannowski (li.) und Dr. Sven Ring vom PVcomB vor den Sputter-Anlagen von Leybold Optics.

linie für CIGS die Anwendung des sogenannten sequentiellen Verfahrens zur Umformung der Absorber für CIGS-Solarmodule. „Mit unseren Inline-Sputter-Anlagen erfüllen wir die hohen Anforderungen des PVcomB, CIGS- und Dünnschicht-Silizium-Solarmodule in einer State-of-the-Art-Umgebung herzustellen“, sagte Patrick Binkowska, Manager der Division Glass & Solar, Leybold Optics, bei der Inbetriebnahme der Anlagen am PVcomB: „Gleichzeitig haben wir durch diese Zusammenarbeit die Chance, aus den Erfahrungen des PVcomB zu lernen. Erkenntnisse daraus fließen direkt in die Weiterentwicklung unserer Anlagen ein.“ *cn*

ZWEI NEUE VIRTUELLE INSTITUTE

Mit den beiden Virtuellen Instituten für **Dünnschichtsolarzellen** und **topologische Quantenphasen** verstärkt das HZB die Zusammenarbeit mit Universitäten.

Virtuelle Institute sind ein Instrument der Helmholtz-Gemeinschaft, um die Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und Helmholtz-Zentren zu initiieren und zu festigen. Sie werden gemeinsam bis zu fünf Jahre finanziell gefördert, ehe über die Fortsetzung der Kooperation entschieden wird. Das gilt auch für die beiden neuen

am HZB angesiedelten Virtuellen Institute, die ihre Arbeit im Dezember 2012 beziehungsweise April 2013 aufgenommen haben.

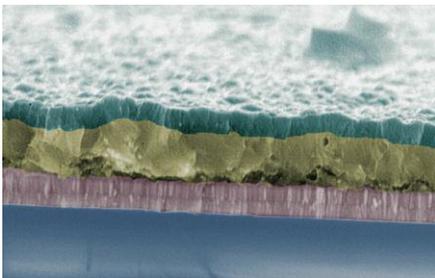
Im Virtuellen Institut „Mikrostrukturkontrolle für Dünnschicht-Solarzellen“ arbeiten seit Dezember 2012 HZB-Wis-

senschaftler mit Kollegen von FU Berlin, TU Berlin, TU Darmstadt und weiteren Partnern zusammen. Ihr Ziel ist die Optimierung von Dünnschichtsolarzellen zur Nutzung von Sonnenenergie zur Stromproduktion. Bisher fehlt ein exaktes Verständnis darüber, wie die Mikrostruktur der polykristallinen Absorberschicht und die elektrischen und optoelektronischen Eigenschaften in solchen Solarzellen zusammenwirken. „Mit dem theoretischen Verständnis der

Zusammenhänge, gekoppelt mit Simulationen und Modellierung, wollen wir hocheffiziente Solarzellen realisieren. Dabei arbeiten wir an zwei technologisch gut etablierten, polykristallinen Systemen: Silizium sowie Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (Cu(In,Ga)Se_2)“, sagt Susan Schorr, Professorin an der FU Berlin und Leiterin der Abteilung Kristallographie am HZB.

Forschung für Quantencomputer

Im Virtuellen Institut „New states of matter and their excitations“, das im April 2013 seine Arbeit aufgenommen hat, sind neben dem HZB auch Wissenschaftler der FU Berlin, des MPI für Physik komplexer Systeme in Dresden, der TU Dresden, der Universität Göttingen und der TU Dortmund beteiligt. Sie beschäftigen sich mit dem kollektiven Verhalten und neuen Phasen der Materie. Hintergrund ist der unglaubliche Reichtum von metallischen, magnetischen und supraleitenden Verbindungen, der seit Jahrzehnten unerwartete Ergebnisse in Grundlagenforschung und Materialwissenschaften hervorbringt. Solche Systeme bilden die Basis unzähliger technischer Anwendungen, die unsere Gegenwart bestimmen. Das systematische Verständnis neuer Phasen ist deshalb der Schlüssel für langfristige technologische Innovation, wie etwa die Suche nach Quantencomputern. Das Virtuelle Institut zielt darauf ab, die führenden Wissenschaftler zusammenzubringen, um diese Herausforderung anzunehmen. cn



Dünnschichtsolarzellen wie diese CIS-Solarzelle stehen im Zentrum eines der neuen Virtuellen Institute am HZB.

HELMHOLTZ-PLATTFORM FÜR DETEKTORSYSTEME

Die Helmholtz-Gemeinschaft hat mit Beteiligung des HZB eine neue Forschungsplattform gestartet: Ziel ist es, die Forschung an Technologien zum Aufbau neuartiger Detektoren für Photonen, Neutronen sowie geladene Teilchen zu vernetzen, die Datenübertragung und -auswertung zu optimieren und exemplarische Detektorprototypen zu entwerfen und zu bauen.

Das HZB entwickelt Systeme für die Detektion von Neutronen, Photonen sowie intelligente, programmierbare

Hardware für die Datenerfassung. „Ein wichtiges Thema in der Neutronenforschung ist der Ersatz von Helium-3 in den Detektoren“, sagt Dr. Thomas Wilpert, der die Neutronendetektorentwicklung koordiniert. Helium-3 ist für Forschungszwecke sehr begehrt, aber knapp und teuer. Deshalb arbeitet das HZB an der Entwicklung von Detektoren mit dem günstigeren Bortrifluorid. Sie sind für ein erfolgreiches Upgrade des HZB-Flugzeitspektrometers NEAT notwendig. Für die Weiterentwicklung sogenannter schneller Photonendetektoren wird zudem ein Messplatz am Elektronenspeicherring BESSY II des HZB eingerichtet. cn

NEUES LABOR FÜR FLÜSSIGKEITEN

HZB und FU Berlin haben gemeinsam ein Labor eröffnet, mit dem Flüssigkeiten und Materialien in Lösung mit modernsten Methoden untersucht werden können.

Ob moderne metallische Werkstoffe oder biologische Substanzen wie Proteine – Prof. Dr. Emad Flear Aziz, Juniorprofessor am Fachbereich Physik der FU Berlin und Gruppenleiter der Nachwuchsgruppe Struktur und Dynamik funktionaler Materialien am HZB, und sein Team erforschen bevorzugt die Struktur und Eigenschaften von Materialien in Lösung. Auch die Grenzflächen zwischen zwei Flüssigkeiten, die sich nicht mischen lassen, sind für die Forscher hoch interessant. Mit dem 2012 eröffneten Labor, das am Elektronenspeicherring BESSY II sowie am Laserlabor der FU Berlin angesiedelt ist, stehen ihnen bisher unerreichte Möglichkeiten zur Untersuchung von funktionalen Materialien in Lösung zur Verfügung. So können sie in der neuen Einrichtung mithilfe von Hochleistungslasern und Synchrotron-Strahlung forschen.

Für die Arbeit stehen Aziz 3,5 Millionen Euro in einem Zeitraum von fünf Jahren zur Verfügung. Die Erkenntnisse der Materialforschung kommen unter anderem Innovationen in

der Medizintechnik und der Energiebranche zugute, etwa bei der Bekämpfung von Krankheiten wie Krebs und bei der Entwicklung von Solarzellen. Die wissenschaftliche Geschäftsführerin des Helmholtz-Zentrums Berlin, Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla, betonte bei der Eröffnung, das gemeinsame Labor biete großartige Möglichkeiten der Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern beider Institutionen, aber auch mit Forschergruppen weltweit. Sie äußerte ebenso wie der Präsident der Freien Universität, Prof. Dr. Peter-André Alt, die Hoffnung, dass es zu weiteren Kooperationen dieser Art komme. *cn*



Prof. Dr. Emad Flear Aziz (re.) beim Einrichten des neuen Labors am Elektronenspeicherring BESSY II.

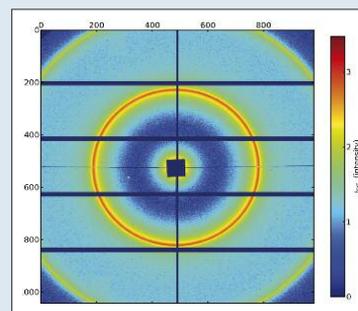
KLEINSTEN BIOMARKERN AUF DER SPUR

Die PTB hat einen neuen Röntgendetektor an BESSY II installiert. Er kann Forschern dabei helfen, die in Nanostrukturen versteckten Auslöser von Krankheiten zu entschlüsseln.

Biomarker können bei der Entstehung und Behandlung von Krankheiten eine wichtige Rolle spielen. Noch ist es für Forscher sehr schwierig, die Konzentration und Größe dieser winzigen Partikel, die in allen Körperflüssigkeiten vorhanden sind, genau zu messen. Ein wichtiger Schritt in diese Richtung ist der neue vakuumkompatible ortsauflösende Pilatus-Detektor, den die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) entwickelt hat. Er wurde 2012 im Labor der PTB am Elektronenspeicherring BESSY II installiert. Dieser Detektor ermöglicht Messungen mit Röntgenkleinwinkelstreuung bei Photonenenergien bereits ab 1,75 keV und damit auch an den Absorptionskanten biologisch wichtiger Elemente wie Phosphor, Schwefel und Kalzium. Damit steht den Wissenschaftlern ein Gerät zur

Verfügung, mit dem sie die Größen von Nanopartikeln bestimmen können, die bisher nur schwer zu charakterisieren waren.

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt und das HZB kooperieren seit langem sehr erfolgreich am Standort Berlin-Adlershof. Seit 1999 betreibt die PTB an BESSY II für ihre Untersuchungen ein eigenes Labor, seit sechs Jahren besteht eine Kooperation auf dem Gebiet der Röntgenkleinwinkelstreuung. Das HZB stellt darüber hinaus den technischen Betrieb der PTB-eigenen Synchrotronstrahlungsquelle „Metrology Light Source“ sicher. *cn*



Erstes Forschungsergebnis, aufgenommen mit dem neuen, vakuumkompatiblen Pilatus-Detektor: Röntgenkleinwinkelstreuung einer Mikrovessikel-Probe (multilamellare Liposome).

VIER MESSPLÄTZE FÜR EMIL

Das Großprojekt EMIL für die **Forschung an Energiematerialien** macht Fortschritte – statt drei wird es nun vier Messplätze erhalten.

Mit EMIL (Energy Materials In-Situ Laboratory Berlin) wird das HZB gemeinsam mit der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) ab 2015 die Forschungsmöglichkeiten an Materialien für die regenerative Energiegewinnung verbessern. Im Mittelpunkt des Projekts steht der Aufbau eines neuen Röntgenstrahlrohrs an der Synchrotron-



Der geplante Anbau an BESSY II schafft Platz für die Labore SISSY I & II@EMIL, CAT@EMIL sowie Rein- und Laborräume.

quelle BESSY II, mit dem diese Materialien analysiert werden können. An diesem Strahlrohr sollen insgesamt vier Experimentierplätze entstehen, an denen Forscher simultan Zugang zu weicher und harter Röntgenstrahlung haben, ihre Proben ohne Unterbrechung des erforderlichen Vakuums präparieren

und an den Experimentierplätzen SISSY I & II@EMIL (Solar Energy Materials In-Situ Spectroscopy I & II at the Synchrotron) untersuchen können. Während SISSY I@EMIL für die Oberflächen- und Grenzflächenanalyse der im SISSY-Labor präparierten Solarenergie-Materialien dient, wird an SISSY II@EMIL ein vom Forschungszentrum Jülich entwickeltes Röntgen-Photoelektronen-Mikroskop (X-PEEM) aufgebaut. Für die Forschung an Katalysatoren, die für die Produktion von Wasserstoff als nachhaltig erzeugtem Brennstoff benötigt werden, entsteht der Experimentierplatz CAT@EMIL. Dem Messplatz PINK, den die MPG innerhalb der bestehenden Halle von BESSY II einrichtet und betreiben wird, steht dann nicht-resonante Röntgenfluoreszenz zur Verfügung. „Im August 2013 sollen die Bauarbeiten für den Anbau an BESSY II beginnen“, sagt Prof. Klaus Lips, der das Projekt am HZB leitet. „In ihm werden dann die Labore SISSY I & II@EMIL und CAT@EMIL, ein Reinraum, ein Chemielabor sowie ein Elektronenmikroskopie-Labor, in dem auch Proben mit einem fokussierten Ionenstrahl präpariert werden können, untergebracht“. Bis 2015 soll EMIL betriebsbereit sein. *cn*

DURCHBRUCH BEIM PHOTOINJEKTOR

Das HZB entwickelt mit dem Projekt BERLinPro eine neuartige Beschleunigertechnologie weiter.

Das ERL-Prinzip klingt bestechend einfach: Im Energy Recovery Linac Prototype werden Elektronenpakete in einem Injektor erzeugt und in einem supraleitenden Linearbeschleuniger (Linac) beschleunigt. Die Elektronen können dann z.B. durch sogenannte Undulatoren (periodische Magnetsysteme) geführt werden, um Strahlung mit hoher Brillanz zu erzeugen. Danach laufen die Elektronenpakete, die kontinuierlich injiziert werden, wieder in den Linac zurück, wo sie abgebremst werden. Dadurch gewinnt man nahezu die gesamte Energie zurück, wodurch erst die Beschleunigung hoher Ströme möglich wird.

Mit BERLinPro möchte das HZB dieses einfach klingende Prinzip in der Praxis umsetzen. Das Projektziel: Einen Elektronenstrahl mit hohem Strom (100 mA), kleiner Emittanz

und kurzer Pulslänge bei voller Energierückgewinnung zu beschleunigen, der geeignet ist, Licht hoher Brillanz in Nutzerqualität zu erzeugen. In einem ersten wichtigen Schritt auf dem Weg zu der für BERLinPro benötigten Elektronenquelle konnten zwei Hohlraumresonatoren (Cavities) mit einer aufgedampften Bleikathode erfolgreich in Betrieb genommen und getestet werden. Aktuell stehen weitere Verbesserungen bei den einzelnen Komponenten im Fokus der Wissenschaftler, mit denen in Simulationen mit theoretischen Modellen schon heute die Zielwerte von BERLinPro deutlich übertroffen werden können. Die Aufträge für die supraleitenden Beschleunigungsstrukturen des Injektors sind bereits erteilt, die der Magneten erfolgt demnächst. 2014 soll der Grundstein für das Gebäude von BERLinPro gelegt werden. Bis zur geplanten Fertigstellung der Anlage einschließlich Energierückgewinnung Ende 2018, wird sie abschnittsweise in Betrieb genommen. Die experimentelle Weiterentwicklung der Schlüsselkomponenten wird parallel laufend weiterverfolgt. *cn*

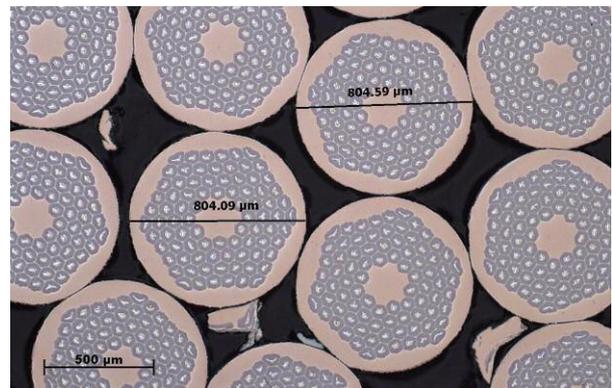
REKORD-MAGNET FÜR DIE NEUTRONENFORSCHUNG

Am HZB entsteht der weltweit stärkste Magnet für Neutronenexperimente, ein **Hochfeldmagnet**, der im Endausbau eine Feldstärke von mehr als 30 Tesla im Innern der Probe erzeugen wird.

An keiner Neutronenquelle weltweit stehen heute Magnetfelder von mehr als 17 Tesla für Experimente zur Verfügung. Doch manche Quanteneffekte machen sich erst oberhalb extrem hoher Magnetfelder deutlich bemerkbar, sodass die Kombination von Neutronenstreuung mit sehr hohen Feldern eine Chance ist, neue Einblicke in die Materie und ihre Eigenschaften zu gewinnen. Dr. Hartmut Ehmler koordiniert in der Projektgruppe für den Hochfeldmagneten (HFM) die gemeinsamen Arbeiten des HZB mit dem National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL), Florida, und weiteren Partnern des Projekts. Denn das Herzstück des HFM ist ein sogenanntes serielles Hybrid-Magnetsystem, das am NHMFL entwickelt wurde. Dabei werden normalleitende und supraleitende Spulen konzentrisch zueinander montiert und elektrisch in Reihe geschaltet, sodass der gleiche Strom von 20.000 Ampere zunächst durch die eine und dann durch die andere Spule fließt.

Die supraleitende Spule sitzt außen und erzeugt ein Hintergrundfeld von 13 Tesla. Im Inneren verstärkt die normalleitende Spule das Magnetfeld in der Probenumgebung auf mindestens 25 Tesla und im Endausbau sogar auf Felder oberhalb von 30 Tesla – das ist etwa eine Million Mal stärker als das Erdmagnetfeld. Die Probe selbst sitzt in einem vergleichsweise kleinen Raum von wenigen Zentimetern Ausdehnung, zwischen zwei konischen Öffnungen, durch welche die an der Probe gestreuten Neutronen die Detektorsysteme erreichen.

Als Supraleiter für die äußere Spule kommen Drähte aus der Legierung Niob-Zinn (Nb_3Sn) zum Einsatz, die mit flüssigem Helium auf vier Grad Kelvin oder minus 269 Grad Celsius gekühlt werden. Die thermischen Strahlungsschilde und die Hochtemperatursupraleiter-Stromzuführungen der supraleitenden Spule haben dank Heliumgas eine Temperatur von etwa 40 Kelvin. Der innere, normalleitende Magnet besteht aus einer Kupferlegierung in Form von sogenannten Bitter-Platten, die die hohen Kräfte am besten aufnehmen können. Bitter-Platten sind aufeinander gestapelte Ringe, die in Form einer Spirale verbunden werden. Den inneren Kupfermagneten kühlt Wasser, das durch die zahlreichen Löcher innerhalb der Bitter-Platten gepresst wird. Die aufgenommene Wärme muss über einen Hochdruck-Kühlwasserkreislauf abgeführt werden.



Der Leiter, aus dem die äußere supraleitende Spule des Hochfeldmagneten gewickelt wird, besteht aus vielen sehr dünnen Drähten, in denen die extrem feinen supraleitenden Filamente in eine Matrix aus stabilisierendem Kupfer eingebettet sind. Im Bild ist ein Querschnitt unter dem Licht-Mikroskop zu sehen.

Besondere Probenumgebung

Der innere Magnet passt genau in das Innere der supraleitenden Spule hinein und erzeugt bei einer Leistung von vier Megawatt ein Feld von rund zwölf Tesla, das sich zu dem Feld der supraleitenden Spule addiert. Am Probenort wirken dann etwa 25 Tesla. Ein so starkes Feld kann durch eine supraleitende Spule allein nicht erzeugt werden – erst die aufwendige Kombination mit dem Kupfermagneten macht dies möglich. Doch nur mit einem starken Magneten lässt sich noch keine Forschung machen: Der Hochfeldmagnet ist sozusagen die besondere Probenumgebung des zugehörigen Neutronen-Instruments EXED (Extreme Environment Diffractometer). Es handelt sich um ein besonders leistungsfähiges Flugzeitspektrometer, das zurzeit weiter ausgebaut wird.

Damit beides – HFM und EXED – in der Neutronenleiterhalle II Platz findet, wurden die Anlagen zur Energie- und Kühlwasserversorgung des Magneten in das angrenzende Technikum ausgelagert. Die HZB-Experten in den Projektgruppen HFM und EXED haben bereits ausführliche Tests abgeschlossen und stehen in den Startlöchern. „Wir hoffen alle, dass der Magnet im Herbst dieses Jahres geliefert werden kann“, sagt Ehmler. Die anschließende Montage und Inbetriebnahme werden noch einmal alle Beteiligten vor große Herausforderungen stellen. arö

ZWEI NEUE INSTITUTE AM HZB

DAS INSTITUT **SOLARE BRENNSTOFFE UND ENERGIESPEICHERMATERIALIEN** GIBT ES SEIT MITTE 2012, DAS INSTITUT **NANOARCHITEKTUREN FÜR DIE ENERGIEWANDLUNG** SEIT JANUAR 2013.

Die Realisierung einer nachhaltigen Energieversorgung ist eine zentrale Aufgabe für unsere Gesellschaft. Die Forschung steht deshalb vor der Herausforderung, zukunftsfähige Ansätze für die Lösung der Energiefrage zu entwickeln. Vor diesem Hintergrund hat das HZB seine Energieforschung mit zwei neuen Instituten verstärkt. Eines davon ist das am 1. Juli 2012 gegründete Institut für Solare Brennstoffe und Energiespeichermaterialien, das Prof. Dr. Roel van de Krol leitet. Parallel zu seiner Berufung zum Leiter des Instituts erhielt der Wissenschaftler einen Ruf an die Technische



Prof. Dr. Roel van de Krol leitet das neue Institut Solare Brennstoffe und Energiespeichermaterialien am HZB.

Universität Berlin. Zuvor war Roel van de Krol Assistenzprofessor an der Universität Delft in den Niederlanden. In Solarzellen wird das Sonnenlicht direkt in Strom umgewandelt. Dieser Strom kann bislang nur in großen Anlagen, den sogenannten Pumpspeicherkraftwerken, gespeichert werden. Eine vielversprechende Alternative für eine nachhaltige Energieversorgung besteht darin, aus dem Sonnenlicht direkt solare Brennstoffe zu erzeugen. Das einfachste Beispiel dafür ist Wasserstoff, der mithilfe der Sonnenenergie durch die Spaltung von Wassermolekülen gewonnen wer-

den kann. Doch die Verfahren dafür sind noch nicht ausgereift. Die direkte Erzeugung von Brennstoffen aus Sonnenlicht ist deshalb die größte Herausforderung, der sich das Institut am HZB stellen wird. Die Wissenschaftler verfolgen die Strategie, Wasserstoff in einem monolithischen Materialsystem zu erzeugen. Das heißt, der halbleitende Absorber und der Katalysator sind in einer Struktur integriert. Die HZB-Forscher um Roel van de Krol wollen neue komplexe Metalloxide entwickeln, die eine kostengünstige und trotzdem chemisch stabile Alternative zu den herkömmlichen Photovoltaik-Halbleitern sein könnten. Dafür wollen sie Nano-Strukturen entwickeln und untersuchen, um die bisher noch ungenügenden inhärenten Halbleitereigenschaften von Metalloxiden zu verbessern.

Ausbau der Solarenergieforschung

Die Werkstoffwissenschaftlerin PD Dr. Silke Christiansen leitet seit Januar 2013 das neue Institut Nanoarchitekturen für die Energiewandlung am HZB. Damit baut das HZB die Solarenergieforschung weiter aus. Für den Aufbau des Instituts steht Silke Christiansen eine zusätzliche Finanzierung durch die Helmholtz-Rekrutierungsinitiative von 600.000 Euro pro Jahr über fünf Jahre zur Verfügung. Bis Ende 2012 leitete sie eine unabhängige wissenschaftliche Technologieentwicklungsgruppe für Photonische Nanostrukturen am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichtes in Erlangen. Am HZB entwickelt sie neuartige Material-Komposite vornehmlich für Solarzellen der dritten Generation und



PD Dr. Silke Christiansen, seit Januar 2013 Leiterin des neuen HZB-Instituts Nanoarchitekturen für die Energiewandlung.

solare Brennstoffe. Dabei deckt sie die gesamte Forschungskette von der Modellierung und Simulation über die Charakterisierung und Nano-Analyse bis hin zur Entwicklung von Verfahrensprozessen und Bauelementen ab. „Neue nanostrukturierte Materialien, Materialverbünde und Composite werden ganz wesentlich für zukünftige Konzepte zur Energiegewinnung und Speicherung sein. Ich freue mich, dass ich in dem einzigartigen Umfeld, das Berlin und die Helmholtz-Gemeinschaft bieten, die Forschung auf diesem Gebiet mit voller Energie vorantreiben kann“, sagt Christiansen. Das neue Institut ergänzt von seiner Thematik die Institute für Silizium-Photovoltaik und für Solare Brennstoffe und arbeitet eng mit diesen Instituten zusammen. Außerdem kooperiert Silke Christiansen mit Arbeitsgruppen an Universitäten sowie mit Industriepartnern. Auf dem Wilhelm Conrad-Röntgen-Campus in Adlershof wirkt sie mit ihrem Team an der Planung und am Aufbau des Energy Materials In-situ Laboratory (EMIL) mit. Am Lise-Meitner-Campus in Wannsee baut sie die Expertise am HZB zur Elektronenmikroskopie weiter aus. cn

EUROPHYSICS PRIZE FÜR ALAN TENNANT

DER AM HZB TÄTIGE PHYSIKER ERHIELT 2012 DEN RENOMMIERTEN FORSCHERPREIS DER **EUROPÄISCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT**.



Als magnetischen Monopol bezeichnen Physiker hypothetische Teilchen, die nur einen magnetischen Pol tragen, also entweder nur magnetischer Nord- oder nur magnetischer Südpol sind. In der Welt der Materie ist dies ganz und gar ungewöhnlich, denn normalerweise treten magnetische Teilchen nur als Dipol auf, das heißt, sie weisen einen Nord- und einen Südpol zugleich auf. Trotzdem gibt es einige Theorien, die die Existenz von Monopolen als Quelle von Magnetfeldern vorhersagen. Unter anderem hat der Physiker Paul Dirac 1931 aus Berechnungen abgeleitet, dass magnetische

Monopole am Ende von sogenannten Dirac-Strings existieren müssten. Diese kann man sich als Schläuche vorstellen, die das magnetische Feld tragen. Prof. Alan Tennant und seine Kollegen konnten 2009 die Existenz magnetischer Monopole an der Berliner Neutronenquelle BER II mithilfe der Neutronenstreuung nachweisen. Für diese Entdeckung erhielt Prof. Tennant den mit 12.000 Euro dotierten Europhysics Prize 2012 der European Physical Society Condensed Matter Division (EPS CMD). Er teilte sich die Ehrung mit fünf weiteren Wissenschaftlern aus der theoretischen

und experimentellen Physik, die ebenfalls Arbeiten zum Nachweis magnetischer Monopole veröffentlicht haben. Die Preisverleihung fand am 5. September 2012 in Edinburgh statt. Tennant betonte vor allem die weitergehende Bedeutung seiner Forschung: „Wir beschreiben neue, fundamentale Eigenschaften von Materie. Sie sind allgemeingültig für Materialien mit derselben Topologie, also Stoffe mit magnetischen Momenten im Pyrochlor-Gitter. Mit so einer Erkenntnis können wir in Zukunft ganz neue Materialien entwickeln.“ *cn*

AUSGEZEICHNETE PRESSEARBEIT

DIE **PRESSESTELLE DES HZB** GEWANN ZUM ZWEITEN MAL DEN IDW-PREIS FÜR WISSENSCHAFTSKOMMUNIKATION.

Der Informationsdienst Wissenschaft (idw) zeichnet jährlich die beste Pressemitteilung aus. Die Jury, die sich aus Journalisten und Wissenschaftlern zusammensetzt, entschied sich 2012 erneut für eine Meldung des HZB, das schon zwei Jahre zuvor die Auszeichnung erhalten hatte. Geehrt wurde damit die Pressemeldung über den „schnellsten Film der Welt“ von Franziska Rott über die Forschung von Prof. Dr. Stefan Eisebitt, der ein neuartiges Verfahren zur Abbildung von Vorgängen auf molekularer Ebene entwickelt hat. Der Text überzeugte die Jury des idw-Preises



V. l. n. r.: Pressesprecherin Dr. Ina Helms und Autorin Franziska Rott erhielten den idw-Preis für Wissenschaftskommunikation für die beste Pressemitteilung des Jahres aus der Hand von idw-Vorstandsmitglied Dr. Markus Zanner, Kanzler der Universität Bayreuth.

sowohl mit der „handwerklichen Professionalität“ als auch mit der „wissenschaftlichen Bedeutung“ des Themas sowie dem „Nachrichtenwert“. Marco Finetti, Pressesprecher der DFG, sagte anlässlich der Preisverleihung, die erneute Preisvergabe an das HZB sei ein bemerkenswerter Doppelerfolg in Anbetracht der Konkurrenz von jährlich 20.000 Pressemitteilungen, die über den idw verbreitet werden. Franziska Rott hatte 2010 in der HZB-Abteilung Wissenschaftsjournalismus der TU Dortmund ein Praktikum absolviert und anschließend als freie Mitarbeiterin Presstexte erstellt. *cn*

KURZ GEMELDET

Henning Döscher, der 2010 an der HU Berlin und am damaligen HZB-Institut „Materialien für die Photovoltaik“ promovierte, wurde von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft mit dem **Dissertationspreis der Sektion Kondensierte Materie** (SKM) ausgezeichnet. Darüber hinaus erhielt er ein **Marie-Curie-Forschungsstipendium** der EU. Das ermöglicht ihm einen zweijährigen Forschungsaufenthalt am National Renewable Energy Laboratory (NREL) in den USA.

Dominic Gerlach wurde im Juni 2012 auf der internationalen Photovoltaik-Konferenz (IEEE PVSC) in Austin/Texas für seinen Beitrag mit dem **Student Award** geehrt. Der Doktorand, der seit 2009 in der Helmholtz-Nachwuchsgruppe von Marcus Bär forscht, untersuchte an BESSY II und der Spring-8 in Japan die elektronische Struktur der Zinkoxid-/Silizium-Grenzfläche.

Dr. Stephan Werner, der als Postdoc im HZB-Institut für Weiche Materie und Funktionale Materialien arbeitet, ist auf der 11th International Conference on X-ray microscopy (XRM 2012) in Shanghai mit dem **Werner Meyer-Ilse Memorial-Preis** ausgezeichnet worden. In seiner Doktorarbeit hat Werner weltweit erstmals dreidimensionale, nanostrukturierte Röntgenoptiken hergestellt und charakterisiert.

ZWEI NEUE NACHWUCHSGRUPPEN AM HZB

DAS BMBF UND DIE HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT FÖRDERN DEN NACHWUCHS IN DER WISSENSCHAFT: AM HZB ENTSTANDEN DIE NEUEN FORSCHUNGSGRUPPEN **NANO- UND MIKROSTRUKTURIERTE SILIZIUM-BAUELEMENTE** SOWIE **NANOOPTISCHE KONZEPTE FÜR CHALKOPYRIT-SOLARZELLEN**.



Dr. Martina Schmid

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert auf der Grundlage des Rahmenprogramms „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING“ unter anderem den BMBF-Nachwuchswettbewerb NanoMatFutur. Damit wird jungen Wissenschaftlern die Möglichkeit gegeben, eine unabhängige Nachwuchsgruppe aufzubauen und neue interdisziplinäre Forschungsansätze in den Nano- oder Werkstofftechnologien zu bearbeiten. Zu den geförderten Wissenschaftlern gehört auch Dr. Christiane Becker,



Dr. Christiane Becker

die seit Dezember 2012 am Helmholtz-Zentrum Berlin eine neue BMBF-Nachwuchsgruppe aufgebaut hat, um nano- und mikrostrukturierte Silizium-Bauelemente für Anwendungen in der Photovoltaik und der Photonik zu entwickeln. Neben zwei Wissenschaftlern aus der Schweiz und Indien arbeiten

eine Doktorandin und eine Ingenieurin aus einem Partnerunternehmen in ihrer Nachwuchsgruppe, die vom BMBF in den nächsten vier Jahren mit rund 950.000 Euro unterstützt wird. Unter dem Titel „Die Nano-SIPPE“ hat Becker ein detailliertes Arbeitsprogramm aufgestellt, mit dem sie entscheidende Verbesserungen bei der Herstellung neuer optischer Bauelemente aus dünnen, feinst strukturierten Siliziumschichten erreichen will. „Wir verwenden dabei Prozesse, die industriell verfügbar sind. Ziel unserer Forschung ist die Entwicklung von Patenten, die der Industriepartner und andere Unternehmen nutzen können“, sagt Becker.

Nachwuchsgruppe „Nanooptische Konzepte für Chalkopyrit-Solarzellen“

Im September 2012 hat die Helmholtz-Gemeinschaft 14 Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler ausgewählt, die an verschiedenen Helmholtz-Zentren ihre eigene Forschungsgruppe etablieren können. Eine davon ist die Wissenschaftlerin Dr. Martina Schmid, die am HZB die Nachwuchsgruppe „Nanooptische Konzepte für Chalkopyrit-Solarzellen“

aufbaut. Chalkopyrite sind Verbindungen aus Kupfer, Indium, Gallium, Schwefel und Selen, die sich dank ihrer Eigenschaften besonders für die Herstellung von Solarzellen eignen. Die daraus gefertigten Solarzellen erreichen den höchsten Wirkungsgrad unter den polykristallinen Dünnschicht-Solarzellen.

Eine Herausforderung sind allerdings nach wie vor hohe Wirkungsgrade bei niedrigen Kosten. Die Lösung könnte in sogenannten Nanooptischen Solarzellenarchitekturen liegen: Mit ihnen ließe sich die Chalkopyrit-Schichtdicke erheblich verringern und dadurch das knappe und teure Schwermetall Indium einsparen. Gleichzeitig könnten durch die Nanostrukturen hohe Effizienzen aufrechterhalten oder durch die Kombination mit Lichtkonzentration sogar noch weiter gesteigert werden. Allerdings gibt es derzeit weder einen experimentellen Nachweis des Konzepts noch umfassende vorhersagefähige Modelle für ultra-dünne Chalkopyrit-Solarzellen. Martina Schmid wird diese Herausforderungen mit ihrer Nachwuchsgruppe am Helmholtz-Zentrum Berlin in Angriff nehmen.

cn

ZWEI NACHWUCHSPREISE DER DGM FÜR WISSENSCHAFTLERINNEN AUS DEM HZB

Die Deutsche Gesellschaft für Materialkunde (DGM) hat im September 2012 im Rahmen ihrer Jahrestagung in Darmstadt ihre jährlichen Nachwuchspreise verliehen und mit Dr. Martina Schmid und Dr. Melanie Timpel zwei Doktorandinnen des HZB ausgezeichnet. Martina Schmid untersuchte in ihrer Doktorarbeit, wie sich Tandemsolarzellen verbessern lassen. Tandemzellen bestehen aus zwei übereinanderliegenden Dünnschicht-Solarzellen, die zusammen mehr Licht einfangen können als eine Zelle allein. Durch Verbesserungen im Aufbau der Topzelle konnte Martina Schmid die Infrarot-Durchlässigkeit von 60 auf 80 Prozent anheben. Melanie Timpel beschäftigte sich in ihrer Dissertation mit der Veredelung von Aluminiumlegierungen und untersuchte die eutektische Mikrostruktur der Legierungen mit verschiedenen Methoden im atomaren Bereich. Die Ergebnisse lieferten einen wesentlichen Beitrag zur Aufklärung des Veredelungsmechanismus.

BEEINDRUCKENDE BILDER DER WISSENSCHAFT

IM RAHMEN DES **HZB SCIENCE-PHOTOWALK „AUGENBLICKE“** RICHTETEN 60 FOTOGRAFEN IM AUGUST 2012 IHRE OBJEKTIVE AUF BESSY II UND LABORE DER SOLARENERGIEFORSCHUNG. ANSCHLIESSEND KÜRTE EINE JURY DIE SIEGER AUS 400 WETTBEWERBSBILDERN.

Ende August 2012 bot sich Profi- und Amateurfotografen die einmalige Gelegenheit, einen Nachmittag lang gemeinsam über das HZB-Gelände in Adlershof zu gehen. Dabei konnten sie den Synchrotronring BESSY II, Einrichtungen der HZB-Solarenergieforschung und ausgewählte Forschungsstationen aus ihrem eigenen Blickwinkel fotografieren. Im Anschluss durften die Teilnehmer ihre besten Fotos einreichen, die von einer vierköpfigen Jury bewertet wurden. „Es ist erstaunlich, wie gut die Qualität der eingereichten Fotos ist. Wir haben viele neue, interessante Blickwinkel auf unsere Forschungsanlagen bekommen“, sagt Dr. Ina Helms, Leiterin der HZB-Abteilung Kommunikation. Daher war es keine einfache Entscheidung, die die Jury aus Profifotograf Michael Setzpfandt, Anika

Müller-Nähte von der Grafikagentur Schleuse01 sowie den beiden HZB-Mitarbeitern Dr. Thomas Gutberlet, Leiter des HZB-Nutzerdienstes, und Ulrich Ewald, Hauptabteilungsleiter Administration, treffen musste. Die Juroren kürten das Bild „Vakuunkammer in Ruhe“ von Lutz Bassin zum Sieger. Zu sehen ist eine Vakuumpreparationskammer mit einem Manipulator, um die zu untersuchenden Proben aufzuheizen. Die Jury vergab zudem einen Sonderpreis für die beste Portraitfotografie an Christian Grozea: Das Foto zeigt einen ehemaligen Kollegen, der in der Werkstatt arbeitet. Die drei Publikumspreise, die von Mitarbeitern des HZB per Stimmabgabe vergeben wurden, gingen an Wolfgang Baier und Uwe Müller (1. Platz), deren Fotos gleich viele Stimmen erhielten, sowie René Art



Siegerfoto des HZB Science-Photowalks: Lutz Bassins „Vakuunkammer in Ruhe“.

(3. Platz). Die fünf prämierten Bilder wurden zusammen mit 15 weiteren ausgesuchten Motiven im Januar 2013 im Bürogebäude von BESSY II erstmals der Öffentlichkeit gezeigt. *cn*

WICHTIGE BERUFUNGEN

Prof. Dr. Rutger Schlatmann, Leiter des PVcomB, ist im Juni 2012 dem Ruf an die Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin gefolgt. Dort hat er die W3-Professur „Solarzellen-Technologie“ angenommen. Es war die erste gemeinsame Berufung des HZB mit dieser Hochschule.

Prof. Dr. Roel van de Krol, der seit dem 1. Juli 2012 das neue HZB-Institut „Solare Brennstoffe und Energiespeichermaterialien“ leitet, erhielt zeitgleich einen Ruf an die TU Berlin (siehe Seite 46).

Prof. Dr. Bella Lake, Leiterin der Abteilung „Quantenphänomene in neuen Materialien“, hat im Juli 2012 den Ruf auf eine W2-Professur an der TU Berlin angenommen. Die Berufung folgte auf die Junior-Professur, die sie zusammen mit der Leitung der Helmholtz-Nachwuchsgruppe im August 2006 an der TU Berlin erhalten hatte.

Prof. Dr. Klaus Lips ist dem Ruf für die W2-Professur „Analytik für die Photovoltaik“ am Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin gefolgt und wurde im Dezember 2012 offiziell ernannt.

KURZ GEMELDET

Das HZB wird gemeinsam mit dem MPI für Kolloid- & Grenzflächenforschung (MPI-KG) in Golm und der TU Berlin 2015 die größte internationale Konferenz für Kleinwinkelstreuung, die **International Small-Angle Scattering Conference** – kurz **SAS 2015** – in Berlin ausrichten.

Die Konferenz **Science & Scientists at ESS** fand am 19. und 20. April 2012 in Berlin statt. Mit über 300 Wissenschaftlern war es die größte wissenschaftliche Tagung auf dem Weg zur Realisierung der Europäischen Spallationsquelle (ESS) in der südschwedischen Stadt Lund. Ziel der Konferenz war es, die Diskussionen um die wissenschaftliche Ausrichtung der Neutronenquelle, die 2019 in Lund eröffnet werden soll, zu bündeln.

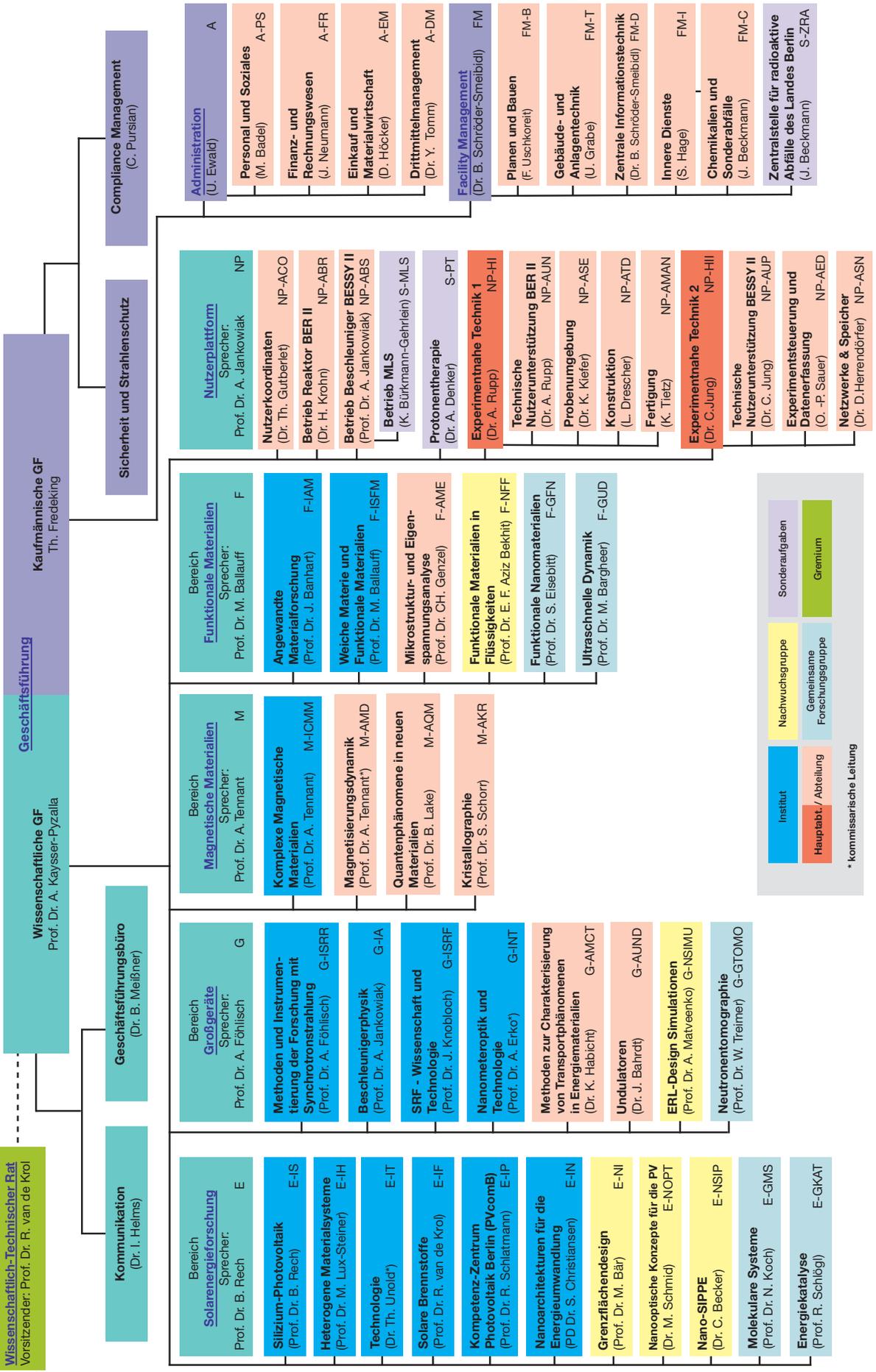
Wissenschaftlicher Beirat
Vorsitzende: Dr. U. Steigebberger

Wissenschaftlich-Technischer Rat
Vorsitzender: Prof. Dr. R. van de Krol

Gesellschaftsversammlung
(Bund und Land Berlin)

Aufsichtsrat
(Vorsitzender: Prof. Dr. J. Treusch)

Betriebsrat
Vorsitzende: E. Lesner



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 Elektromagnetspeicherring BESSY II.



Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

IMPRESSUM

HZB-Highlight-Bericht 2012 des Helmholtz-Zentrums Berlin für Materialien und Energie GmbH. Nachdruck nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Herausgebers.
Redaktionsschluss: Juni 2013

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), 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), Christoph Seidler (cs)

Übersetzung: 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
info@elbedruckerei.de, www.elbedruckerei.de

Fotonachweis: Alle Fotorechte beim HZB, außer: S. 2/3 HZB/Dirk Butenschön, S. 8 HZB/Michael Fernahl, S. 10 HZB/Inga Jürgensen, S. 13 Christopher Pöhlker/MPI für Chemie, S. 14 HZB/M. Setzpfandt, S. 20/21 Markus Wahl/FU Berlin, S. 22 HZB/M. Setzpfandt, S. 24 RUB/Abrudan, S. 32 wikipedia.de/Bernd Gross, S. 34 HU-Berlin, S. 37 University of Sydney, S. 38 HZB/Frank Steinmann, S. 43 HZB/Bernd Wannenmacher, Abb.: PTB, S. 44 hanneskrause architekten, S. 47 idw, S. 49 HZB/Lutz Bassin

Kontakt

Lise-Meitner-Campus

Hahn-Meitner-Platz 1
(ehemals Glienicke Str. 100)
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-I-office@helmholtz-berlin.de

PVcomB

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