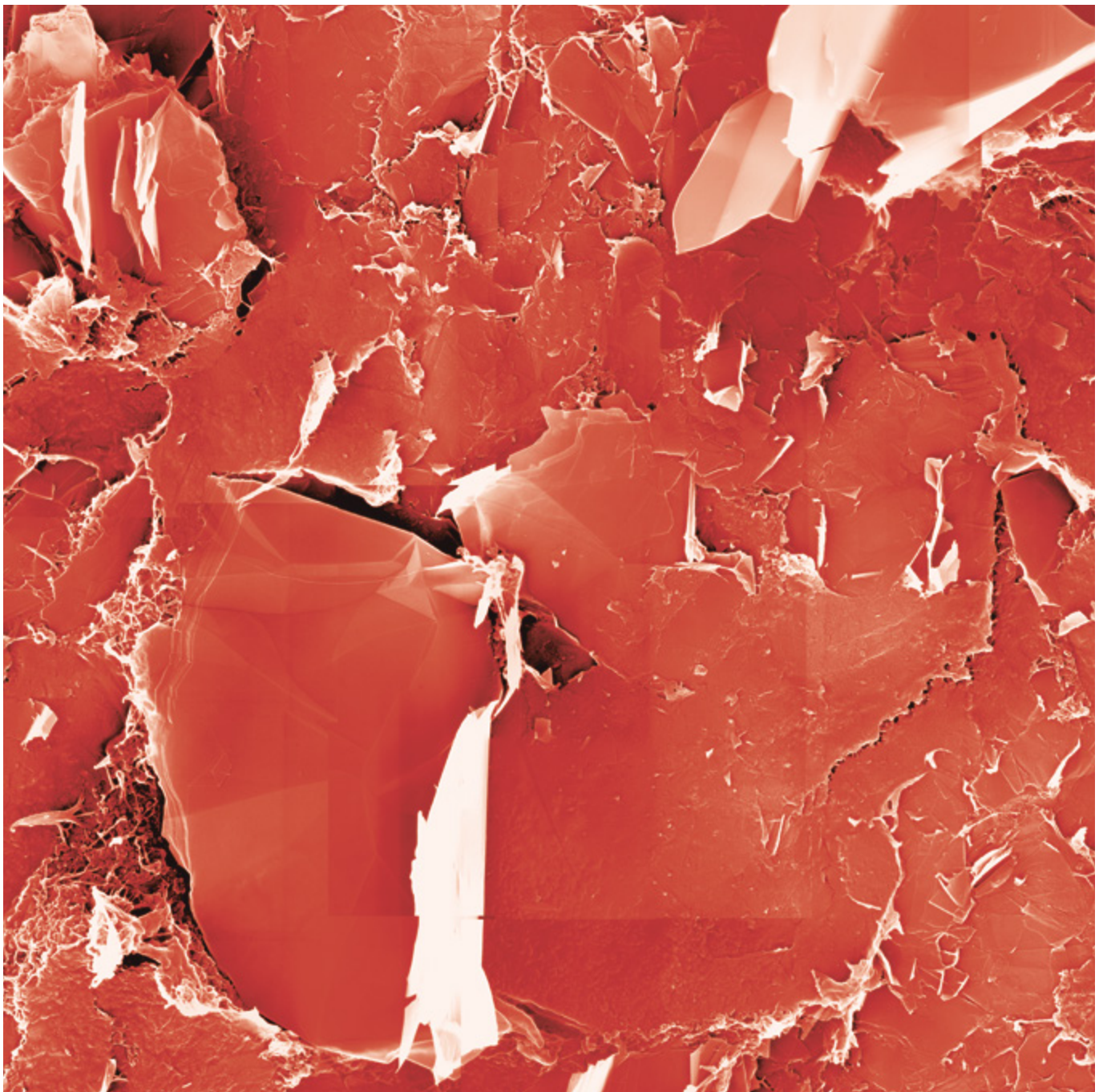

FORSCHUNG UND WIRTSCHAFT Organische Solarzellen, Nanosicherheit, Silizium-Hochdruck-Nanokristalle

INTERVIEW Harald Cremer, Clustermanager NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW, im Interview

RISIKOFORSCHUNG Nanomaterialien und REACH

TERMINE Veranstaltungen rund um die Nanotechnologie





NANOENERGIE IN SUMME

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

dreieinhalb Jahre sind vergangen, seit wir im April 2010 die erste Ausgabe des NanoEnergie-Newsletters herausgegeben haben. In der Zwischenzeit haben wir rund 6.000 Print-Newsletter samt Anschreiben eingetütet und 14.500 Empfänger per Mail bedacht. 120 Wissenschaftler, Vertreter aus der Industrie und Politiker haben dazu beigetragen, 103 Artikel und Interviews zu veröffentlichen. Sie haben sich wertvolle Zeit genommen, Ihre Artikel selbst zu schreiben oder standen für Interviewfragen zur Verfügung. Ihnen allen möchte ich an dieser Stelle für Ihre wertvollen Beiträge danken.

Nach dieser Einleitung können Sie sich denken, was folgt: Das Ziel2-Projekt, über das der Newsletter freundlicherweise gefördert

wurde, ist ausgelaufen und erfolgreich in die Arbeit im NanoEnergieTechnikZentrum übergegangen. Doch wir haben bereits neue Finanzierungsmöglichkeiten ins Auge gefasst, um den Newsletter weiterhin herausgeben zu können.

Daher sind wir zuversichtlich, dass Sie dennoch bald wie gewohnt die nächste Ausgabe des Newsletters aus unserem Haus erhalten.

Eine inspirierende Lektüre des 11. NanoEnergie-Newsletters wünscht Ihnen

Prof. Dr. Christof Schulz,
Wissenschaftlicher Direktor NanoEnergieTechnikZentrum

Impressum

HERAUSGEBER

CENIDE

AUSGABE

11 (2013)

ERSCHEINUNGSWEISE

NanoEnergie erscheint 3- bis 4-mal im Jahr

PROJEKTLEITUNG

Birte Vierjahn

REDAKTION

Birte Vierjahn, CENIDE |
Michael Houben, Marcellini Media GmbH

KONZEPT UND UMSETZUNG

Marcellini Media GmbH

PAPIER

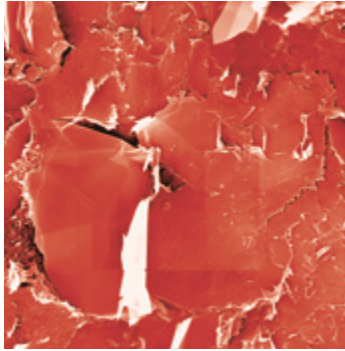
Gedruckt auf EnviroTop
(aus 100 % Altpapier, klimaneutral
produziert) mit Druckfarben
aus nachwachsenden Rohstoffen

DRUCK

Gutenberg-Druckerei GmbH,
Bottrop

KONTAKT

Birte Vierjahn
Postanschrift: Forsthausweg 2;
Besucheranschrift: Carl-Benz-Str.199
47057 Duisburg
Tel.: +49 203 379-8176
E-Mail: cenide@uni-due.de
www.cenide.de



*Bruchfläche eines Formteils aus einem elektrisch leitfähigen Kunststoff.
Das Bild entstand aus 49 REM-Einzelaufnahmen.
© Jens Dörner, Institut für Produkt Engineering*

Editorial

2 NANOENERGIE IN SUMME

Vorwort von Prof. Dr. Christof Schulz

Kurznachrichten

4 AKTUELLES AUS DER FORSCHUNG IN KÜRZE

Interview

6 AUF DIE RICHTIGEN THEMEN SETZEN

Interview mit Harald Cremer | Clustermanager NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW, Düsseldorf

Forschung & Wirtschaft

8 STAPELN VON NANOSTRUKTUREN

Prof. Dr. Peter Müller-Buschbaum | Technische Universität München | Physik-Department, Lehrstuhl für funktionelle Materialien

10 NANOSKOPISCHE KURZSCHLÜSSE

Volker Naumann | Dr. Christian Hagendorf | Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Halle (Saale)

12 NANOMATERIALIEN UND REACH

Dr. Rolf Packroff | Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fachbereich „Gefahrstoffe und biologische Arbeitsstoffe“, Dortmund

15 ORGANISCHE SOLARZELLEN

Dr. Niels Benson | Institute of Technology for Nanostructures (NST), Universität Duisburg-Essen

16 SILIZIUM-HOCHDRUCK-NANOKRISTALLE

Dr. Stefan Wippermann | Grenzflächenchemie und Oberflächentechnik, Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf

18 NYLON ALS KATALYSATORTRÄGER

Prof. Dr. Jochen Gutmann | Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West e. V., Krefeld

Termine

19 VERANSTALTUNGEN RUND UM DIE NANOTECHNOLOGIE

BATTERIE-ELEKTRODEN AUS REISHÜLSEN

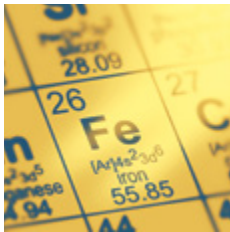
Siliziumdioxid steigert Ladeleistung ohne Kapazitätsverlust

Koreanische Materialforscher entdeckten kürzlich einen wertvollen Rohstoff: Reisspelzen. Die harten Hüllschichten der Reiskörner enthalten eingelagertes Siliziumdioxid und eignen sich als Rohmaterial für moderne Hochleistungsakkus. Das SiO_2 schützt die wachsenden Körner vor schädlichen Einflüssen und gibt ihnen Stabilität. In Lithium-Ionen-Akkus eignet es sich hervorragend als Anodenmaterial. In dem Nebenprodukt der Reisernte ließ sich SiO_2 unter dem Mikroskop mit einem Anteil von zwanzig Prozent in Form von Anhäufungen aneinandergelagerter Partikel schwammähnlichen Aufbaus nachweisen. Die feinporige Struktur hilft, die Kapazität von Batterien zu steigern. Verglichen mit herkömmlichen Graphit-Anoden ermöglicht das Silizium eine zehnmal höhere Ladeleistung. Ein Kapazitätsverlust der Akkus nach mehrmaligen Ladezyklen ist durch die Feinstruktur des Reishüllen-Materials nicht zu erwarten. Nach Aussage der Wissenschaftler sei ein Mangel an Rohmaterial nicht zu befürchten, da es weltweit in Mengen von ca. 422 Millionen Tonnen angebaut wird und als Siliziumquelle nutzbar wäre.

Quelle: www.wissenschaft-aktuell.de



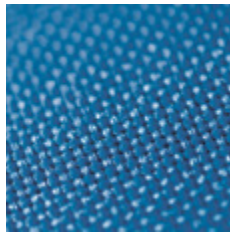
Fotos: © istockphoto.com (4)



EISEN-NANOPARTIKEL ALS GRÜNER KATALYSATOR

Japanischen und kanadischen Wissenschaftlern gelang eine beträchtliche Effizienzsteigerung in der Hydrogenierung – ein Durchbruch im Feld der „Grünen Chemie“. Bisher wird auf seltene und teure Metall-Katalysatoren wie Palladium oder Platin zurückgegriffen, um chemische Reaktionen zu beschleunigen. Experimente bewiesen, dass einfacher verfügbare Eisen-Nanopartikel in der Katalyse ebenso ergiebig sind. Das durch Polymere verstärkte Eisen rostet in Verbindung mit Wasser nicht und soll künftig auch in anderen organischen Umwandlungen Verwendung finden.

Quelle: www.riken.jp



KUGELKRAFTWERK ALS MOBILE STECKDOSE

Entwicklern des Georgia Institute of Technology in Atlanta ist es gelungen, einen neuartigen, tragbaren Generator zu entwickeln, der sich den triboelektrischen Effekt zunutze macht. Mithilfe von aneinanderreibenden Kunststofffolien aus Polyamid und Polytetrafluorethylen ist es möglich, Strom von bis zu 260 Volt bei 50 Mikroampere zu erzeugen. Damit können LED-Taschenlampen und andere mobile Elektronik versorgt werden. Schwere Ersatzakkus oder Solarmodule bei Expeditionen werden überflüssig, da der Generator wetterunabhängig Strom liefert.

Quelle: www.wissenschaft-aktuell.de



HAT PLATIN BALD AUSGEDIENT?

Ein Forscherteam der Michigan Technical University ersetzte kürzlich das teure Element in Farbstoffsolarzellen durch 3D-Graphen. Herstellungsgrundlage des dreidimensionalen Werkstoffes, der sich durch hohe elektrische Leitfähigkeit und hohe katalytische Aktivität auszeichnet, ist seine zweidimensionale Grundform in Kombination mit Lithiumoxid und Kohlenstoffmonoxid. Messungen ergaben, dass Graphenelektroden bei geringeren Materialkosten eine nahezu identische Leistung erzeugen und Platin für Gegenelektroden künftig obsolet machen.

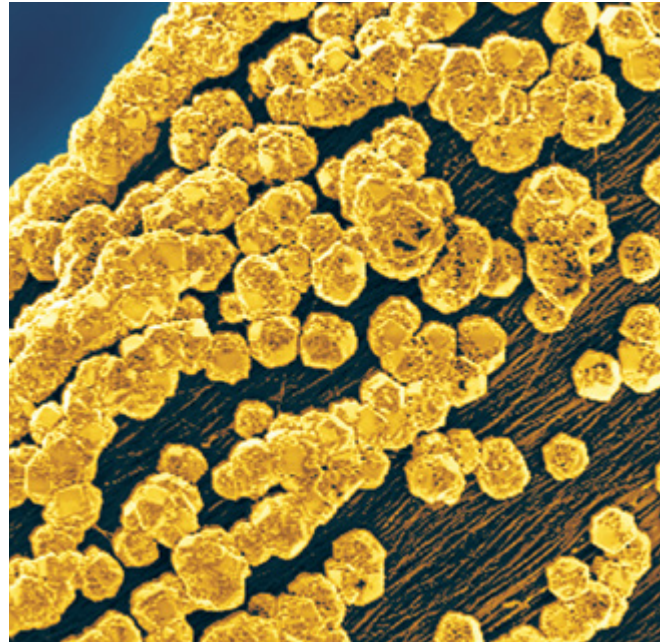
Quelle: www.mtu.edu

SÄGEDRÄHTE AUS KOHLENSTOFF-NANORÖHREN

Geringerer Schnittverlust dank Diamantbeschichtung

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik entwickelte mit Kollegen der australischen Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation ein materialsparendes Verfahren, bei dem Sägedrähte aus Kohlenstoff-Nanoröhren und Diamant verwendet werden, um Siliziumwafer bei ihrer Fertigung mit minimalem Schnittverlust zu trennen. Die Röhren bestehen aus hauchdünnen, aber extrem stabilen Fäden, die mit Diamant beschichtet werden. Trotz problematischer Synthese ist ihre Verwendung als harter und belastbarer Verbundwerkstoff, als Element hochempfindlicher Sensoren oder in thermoelektrischen Generatoren denkbar. Kohlenstoff bildet bevorzugt Graphit. So wächst Diamant nur unter extremen Bedingungen in einer kohlenwasserstoffhaltigen Atmosphäre. Da Kohlenstoff bevorzugt Graphit bildet, ist Diamant schwer zu züchten. Damit sich kein Graphit auf der Oberfläche der Röhren ablagert, wird reaktionsfreudiger Wasserstoff eingesetzt, der es wegätzt. Dieser Prozess greift allerdings auch die Röhren an. Abhilfe gegen den aggressiven Wasserstoff schafft eine schützende Ummantelung aus Quarzglas, auf der infolge Diamant wächst.

Quelle: www.fraunhofer.de/de/presse.html



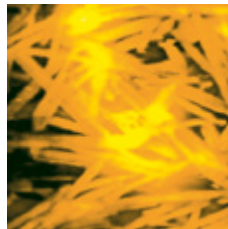
Fotos: © Fraunhofer IWM (1), © CENIDE (1), © BMBF (1), © G. Kucsko, Harvard University (1)



ZWANZIG20 – PARTNERSCHAFT FÜR INNOVATION

Mit diesem Förderprogramm unterstützt das BMBF Konsortien aus Wissenschaft und Wirtschaft bis 2019 mit 500 Millionen Euro. Im Vordergrund stehen unter anderem die Entwicklung von neuartigen Baustoffen, von Medikamenten und Therapien sowie die Sicherstellung einer bezahlbaren und sauberen Energieversorgung. Insbesondere sollen der ostdeutsche Innovationsraum sowie dessen Zusammenarbeit mit westdeutschen Partnern und Regionen stärker gefördert werden. Das Programm knüpft an die bisherige Förderpolitik und die Initiative „Unternehmen Region“ an.

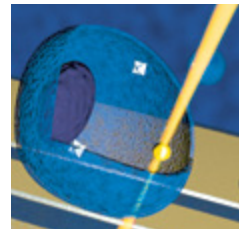
Quelle: www.bmbf.de/press/3496.php



LEICHTGEWICHT-NANO-BÄNDER FÜR SOLARZELLEN

Mit dem Ziel, die dünnsten und leichtesten funktionsfähigen Solarmodule herzustellen, gelang es Forschern der Rice University in Houston erstmalig, konzentrische hexagonale Nanobänder aus Graphen zu synthetisieren. Experimente im Labor ergaben, dass das im Gegensatz zu anderen Solarzellen zweilagige, nur einen Nanometer dünne Material gestapelt die Effizienz von Solarmodulen signifikant erhöhen kann. Bis zu 50-mal dünnere Module sind somit denkbar. Verwendet werden können die Graphen-Nanobänder zudem in der Raumfahrt oder im Transportwesen.

Quelle: www.nanomagazine.co.uk



NANTHERMOMETER FÜR DAS ZELLINNERE

Forscher der Harvard University in Cambridge, Massachusetts, haben eine Möglichkeit entwickelt, Temperaturen im Inneren von organischen Zellen zu messen. Dabei verwendeten sie Nanodiamanten als Sonden und erzielten eine Messgenauigkeit von bis zu einem Zehntel Grad Celsius. Auch die räumliche Auflösung von bis zu 200 Nanometern ist so hoch, dass unter anderem in menschlichen Zellen problemlos bestimmt werden kann, wo gerade Wärme freigesetzt wird. Mögliche Anwendungsgebiete liegen in der Zellbiologie, in der Chemie oder in der Materialforschung.

Quelle: www.weltderphysik.de



AUF DIE RICHTIGEN THEMEN SETZEN

Interview mit Harald Cremer, Clustermanager NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW

Herr Cremer, welche Aufgabe hat der Landescluster NMWP.NRW und welche Ziele hat er sich gesteckt?

Der Landescluster NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW entstand 2009 im Rahmen der Exzellenzinitiative der nordrhein-westfälischen Landesregierung zur Stärkung der Position NRW in den Schlüsseltechnologien Nanotechnologie, Mikrosystemtechnik, Neue Werkstoffe und

Optische Technologien. Unser Ziel ist es, durch die Bündelung von Kompetenzen das Potenzial der nordrhein-westfälischen Forschungs- und Industrielandschaft bestmöglich auszuschöpfen. Konkret möchten wir neue Kooperationen, Forschungsprojekte und innovationsfördernde Dialoge rund um die vier Schlüsseltechnologien ermöglichen und fördern, was uns insbesondere durch unsere Netzwerkfähigkeiten

gelingt. So bringen wir Unternehmen und Institute sowie Akteure verschiedener Branchen oder Disziplinen zusammen, beispielsweise auf Fachkongressen, in Workshops oder an Gemeinschaftsständen bei (inter)nationalen Messen.

Was zeichnet Nordrhein-Westfalen als Standort für Zukunftstechnologien aus?

Der Standort Nordrhein-Westfalen ist im

Hinblick auf die genannten Schlüsseltechnologien stark aufgestellt und nimmt im bundesweiten Vergleich den Spitzenplatz ein. Das manifestiert sich zum Beispiel in der hohen Dichte an Unternehmen und Instituten hier in NRW und einem sehr erfolgreichen Mix aus Mittelstand, Großunternehmen und Forschungsinstituten. In den vier Technologiebereichen gibt es in Nordrhein-Westfalen rund 7.000 Unternehmen und Institute sowie ca. 700.000 Menschen, die einen Jahresumsatz von mehr als 200 Milliarden Euro erarbeiten. Im Hinblick auf die Nanotechnologie ist NRW mit landesweit über 520 Unternehmen und Instituten – und damit fast doppelt so vielen wie im Fall des Zweitplatzierten – nationaler Spitzenreiter.

Welche Rolle kommt der Nanotechnologie Ihrer Meinung nach zu und warum lohnt es, sie zu fördern?

Die Nanotechnologie besitzt ein enormes Potenzial sowohl für die Verbesserung verschiedenster Lebensbereiche als auch für die deutsche Wirtschaft. Ihre Einsatzbreite reicht von der Werkstofftechnik und der Chemie über Biotechnologie, Pharmazie und Medizintechnik bis zur Energiegewinnung, -speicherung und zum Umweltschutz. Mit ihrer Innovationskraft schafft sie neue Lösungsansätze

»NORDRHEIN-WESTFALEN NIMMT IM BUNDESWEITEN VERGLEICH DEN SPITZENPLATZ EIN.«

für die großen Herausforderungen unserer Zeit, wie zum Beispiel den Klimaschutz und die Energieversorgung. Gerade in Anbetracht dieser Global Challenges ist Nanotechnologie eine enorme Chance, die einer entsprechenden Förderung bedarf.

Halten Sie die aktuelle Förderung der Nanotechnologie für ausreichend?

Grundsätzlich wird die Nanotechnologie von Seiten der Länder, des Bundes und der EU bereits recht gut unterstützt, jedoch gilt auch hier sicherlich die plakative Aussage „viel hilft viel“. Dabei kann es natür-

lich nicht einfach nur um mehr Geld gehen, sondern es muss sichergestellt sein, dass die Förderung mit ständiger Beobachtung der Technologiepotenziale einhergeht. Dabei gilt es, die Technologien und Ansätze mit den größten Potenzialen zu fokussieren. Nur wenn wir es schaffen, hier auf die richtigen Themen zu setzen, kann es NRW und Deutschland – vor anderen Staaten – gelingen, starke Unternehmen aufzubauen und viele Arbeitsplätze zu sichern.

Wie schätzen Sie die öffentliche Wahrnehmung des Themas „Nano“ ein, und was gilt es in dieser Hinsicht zu verbessern?

Die Nanotechnologie ist – im Verhältnis zu anderen Bereichen – immer noch ein junges Themenfeld und hat deshalb häufig außerhalb des Expertenkreises, in der Öffentlichkeit, noch eine recht schwammige Wahrnehmung. Durch vermehrte Kommunikation sollte ein besseres allgemeines Verständnis dessen angestrebt werden, was Nanotechnologie ist und welche breiten Anwendungsmöglichkeiten sie bietet. Den meisten Menschen ist wohl kaum bewusst, dass Nanopartikel schon heute Einzug in fast alle Bereiche der industriellen Nutzung gehalten haben. Ein größeres öffentliches Bewusstsein der Chancen durch Nanotechnologie liegt mir persönlich am Herzen.

Welchen Effekt haben wirtschaftliche Veränderungen auf die nanotechnologische Forschung, wie etwa die Krise der Solarbranche?

Die Krise in der Solarbranche hat aus meiner Sicht nur sehr wenig mit der deutschen Technologie- und Prozesskompetenz zu tun, sondern ist vielmehr ein Resultat von äußeren, politisch induzierten Einwirkungen und den daraus entstandenen Verzerrungen des Marktes. Es zeigt sich – auch anhand der Solarkrise – dass in einem Hochlohnland wie Deutschland die einzige Chance für uns darin liegt, dass wir dem Rest der Welt technologisch immer einen Schritt voraus sind, bevor Märkte bei uns verschwinden. Diese Aussage steht auch in direktem Kontext mit dem Lissabon-Ziel, denn die öffentlichen wie auch privaten Ausgaben für Forschung und Entwicklung müssen erhöht werden. Wir dürfen uns in dieser

in stetem wirtschaftlichen Wandel befindlichen Welt nicht auf unserer grundsätzlich guten Position ausruhen.

Wo sehen Sie die aktuellen Trends der Nanoforschung, und welche Potenziale bergen sie?

Die nanotechnologische Forschung konzentriert sich aktuell besonders auf die Lösung der gesellschaftlichen Herausforderungen wie Gesundheit, Energiespeicherung und -erzeugung, Ressourceneffizienz oder auch Informationstechnologie. In vielen dieser Bereiche wären

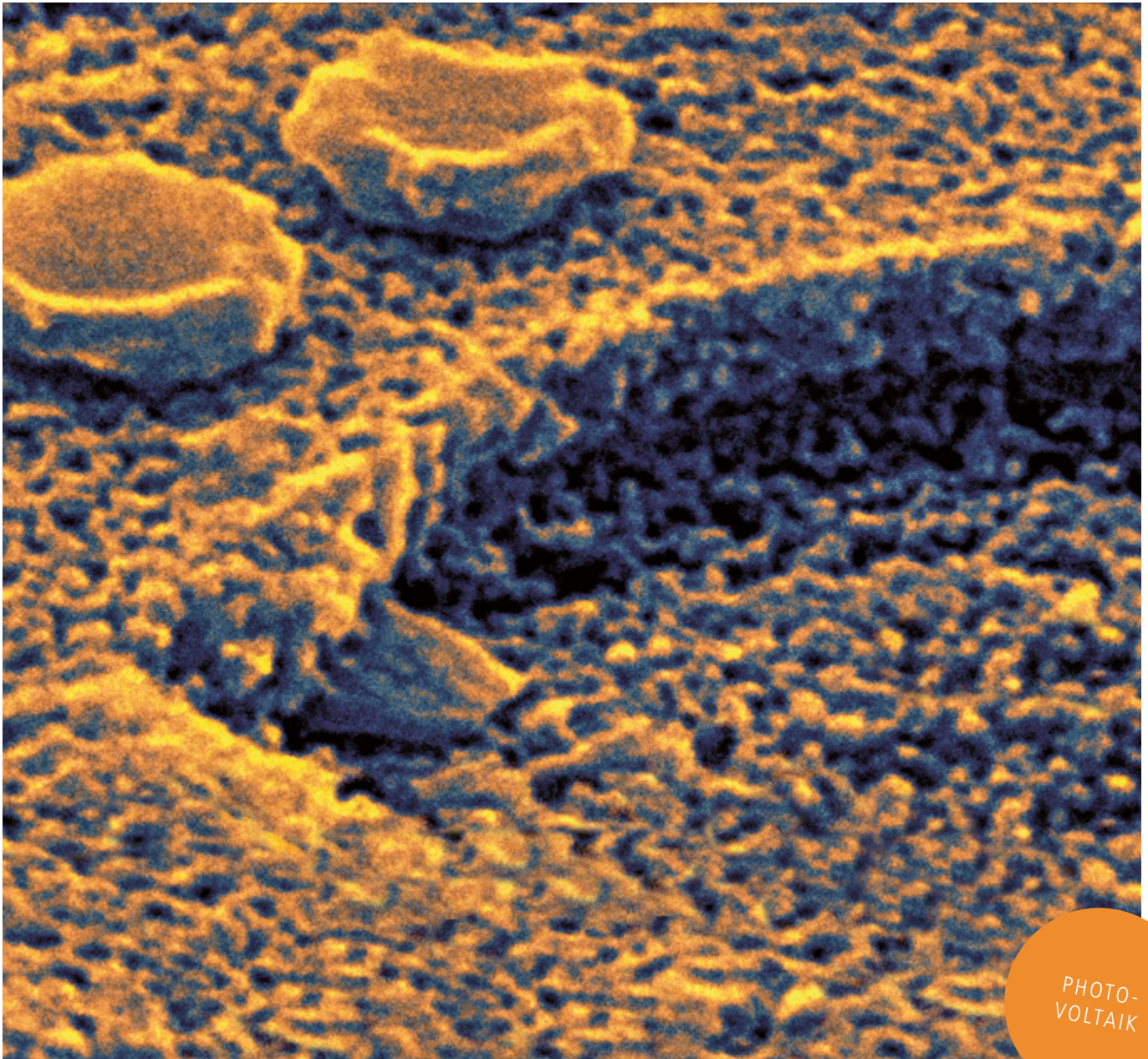
»SCHON HEUTE IST NANO IN ALLEN INDUSTRIELLEN BEREICHEN VERTRETEN.«

neue Lösungsansätze ohne Nanotechnologie erst gar nicht möglich. Zum Beispiel sind im Gesundheitsbereich, insbesondere in der Therapie oder Diagnostik, mithilfe der Nanotechnologie bereits große Fortschritte erzielt worden. Besondere Potenziale liegen auch in der Bekämpfung von bisher unheilbaren Krankheiten oder der personalisierten Medizin.

Wenn Ihnen die sprichwörtliche Fee drei Wünsche für die zukünftige Entwicklung des Landesclusters und der Nanotechnologie erfüllen würde, welche wären das?

Ich würde mir wünschen, dass NRW seine führende Rolle im Bereich der Nanotechnologie auch in Zukunft behalten und weiter ausbauen kann. Außerdem würde ich mir im Hinblick auf die knappen öffentlichen Kassen wünschen, dass Nanotechnologie in Nordrhein-Westfalen weiterhin die nötige Förderung und Unterstützung erfährt. Bezüglich der Entwicklung des Landesclusters bin ich, ehrlich gesagt, grundsätzlich sehr zufrieden und zuversichtlich, dass dies auch ohne eine gute Fee zukünftig so bleibt.

**Harald Cremer, Clustermanager
NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW,
Düsseldorf**



Fotos: © Prof. Dr. Peter Müller-Buschbaum

STAPELN VON NANOSTRUKTUREN

Neue Möglichkeiten für organische Solarzellen

Organische Solarzellen liefern Möglichkeiten zur Energieumwandlung von Licht zu Strom jenseits der konventionellen siliziumbasierten Photovoltaik. Im Vergleich zur Siliziumtechnologie können alternative Herstellungsverfahren wie Offsetdruck oder Siebdruck verwendet werden, die deutlich weniger Energie benötigen. Organische Solarzellen können zudem mechanisch flexibel sein,

haben ein geringes Gewicht und funktionieren auch unter diffusen Lichtverhältnissen, was für Anwendungen in Europa und Asien von großem Vorteil ist. Durch die breite Vielfalt der zur Verfügung stehenden Materialien ergeben sich neue Materialkombinationen, die sich gut für den Einsatz in organischen Solarzellen eignen. So sind zum Beispiel in hybriden organischen Solarzellen anorganische

und organische Halbleiter miteinander kombiniert. Typischerweise wird der anorganische Halbleiter zum Elektronentransport (n-Leiter) und der organische Halbleiter zum Lochtransport (p-Leiter) verwendet.

Am Lehrstuhl für Funktionelle Materialien am Physik-Department der Technischen Universität München untersucht

ein Forschungsteam unter der Leitung von Prof. Peter Müller-Buschbaum verschiedene Konzepte organischer Solarzellen bezüglich ihrer Struktur- und Eigenschaftsbeziehung. Durch spezielle Nanostrukturen, die in diesen Solarzellen eingebaut sind, lässt sich die Grenzfläche zwischen dem p- und n-leitenden Material maßschneidern. Da an dieser Grenzfläche die Trennung der aus dem Licht generierten Elektronen-Lochpaare stattfindet, führt dieses Maßschneidern zu einer Steigerung der Solarzelleneffizienzen. Zudem werden die Strukturen hinsichtlich einer besseren Ausnutzung des einfallenden Lichts optimiert.

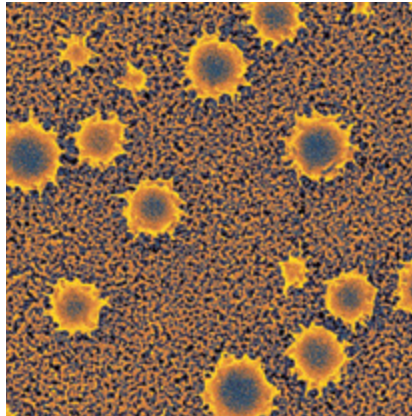
Für hybride organische Solarzellen realisierte das Team zum Beispiel sehr komplexe Nanostrukturen aus Titandioxid, das als n-Leiter in den Solarzellen genutzt wird. Mithilfe von strukturgebenden Hilfspolymeren lassen sich

»ORGANISCHE SOLARZELLEN HABEN EIN GERINGES GEWICHT, FUNKTIONIEREN UNTER DIFFUSEN LICHTVERHÄLTNISSEN UND LASSEN VIELE MATERIALKOMBINATIONEN ZU.«

diese Nanostrukturen in Flüssigkeitsmischungen vorformen und durch Erhitzen in leitende, stabile Strukturen umwandeln. Durch die gezielte Wahl der strukturgebenden Polymere und das Einstellen der Mischungsverhältnisse der Flüssigkeiten können unterschiedliche Nanostrukturen hergestellt werden.

Diese Nanostrukturen lassen sich dann wie aus einem Baukasten kombinieren. In einem Schichtstapel kombiniert oder nebeneinander angeordnet entstehen so hierarchische Strukturen. Diese bilden nach der Rückbefüllung mit dem organischen p-leitenden Material die aktive Schicht der Solarzelle. Die kleine Abbil-

dung zeigt das Beispiel eines Schichtstapels aus porösem Titandioxidschaum und pfannkuchenartigen Titandioxidscheiben. Die Porengröße der Schaumstruktur und die Durchmesser der



Aufsicht auf Schaumstruktur mit pfannkuchenartigen Scheiben aus Titandioxid

Scheiben können hierbei getrennt voneinander eingestellt werden. Schaumstrukturen sind gut für eine erhöhte mechanische Stabilität und für den Ladungstransport über das ausgebildete Netzwerk. Die Scheiben brechen das Licht, verlängern so den Lichtpfad in der Probe und können die Reflexion von Licht reduzieren. Damit erhöhen sie den Anteil des zur Energieumwandlung bereitstehenden Lichts.

Unabdingbar zur Bestimmung der Struktur-Eigenschaftsbeziehung ist die Ermittlung der Morphologie der Filme. Neben abbildenden Methoden im Realraum, wie der Elektronenmikroskopie (siehe kleine Abbildung) und der Raster-

»MAN KANN NANO-STRUKTUREN WIE AUS EINEM BAUKASTEN KOMBINIEREN.«

kraftmikroskopie, werden am Lehrstuhl für Funktionelle Materialien insbesondere Streumethoden verwendet. Oberflächen-sensitive Röntgen- und Neutronenstreuung liefert die nötigen Einblicke in die inneren Strukturen der aktiven Schichten

der Solarzellen. Diese Experimente werden oft an Großforschungseinrichtungen wie Synchrotronstrahlungs- und Neutronenquellen durchgeführt. Hier lassen sich mit Subnanometergenauigkeit die charakteristischen Längenskalen mit sehr hoher statistischer Aussagekraft messen. Zwischen molekularen Abmessungen und Aussagen über die Kristallstruktur und mesoskopischen Längenskalen im Mikrometerbereich sind alle relevanten Längen detektierbar. Röntgen- und Neutronenstreuung sind durch die unterschiedlichen Kontrastverhältnisse zueinander komplementär und können in Kombination auch Strukturen in komplexeren ternären Systemen aufklären.

»IN SITU-EXPERIMENTE KÖNNEN STRUKTURELLE ÄNDERUNGEN IN DER SOLARZELLE AUFZEIGEN. DIES IST FÜR EIN GRUNDLEGENDES VERSTÄNDNIS VON VORTEIL.«

Der Schichtaufbau der Solarzelle kann Schritt für Schritt mit den Streumethoden verfolgt werden. Dies führt zur vollständigen Kontrolle der Strukturen in dem komplexen Stapel, der schließlich zum Bauelement Solarzelle wird. Es wird ermittelt, wie der aktuelle Prozessschritt die zuvor etablierten Nanostrukturen beeinflusst oder gar modifiziert. Zudem erlauben diese zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden die Messung simultan zum Betrieb der Solarzellen. Diese in situ-Experimente zeigen strukturelle Änderungen in den Solarzellen bedingt durch den Betrieb. Dies ist für ein grundlegendes Verständnis, zum Beispiel hinsichtlich Alterungsmechanismen, von großem Vorteil.

Prof. Dr. Peter Müller-Buschbaum, Technische Universität München Physik-Department, Lehrstuhl für Funktionelle Materialien

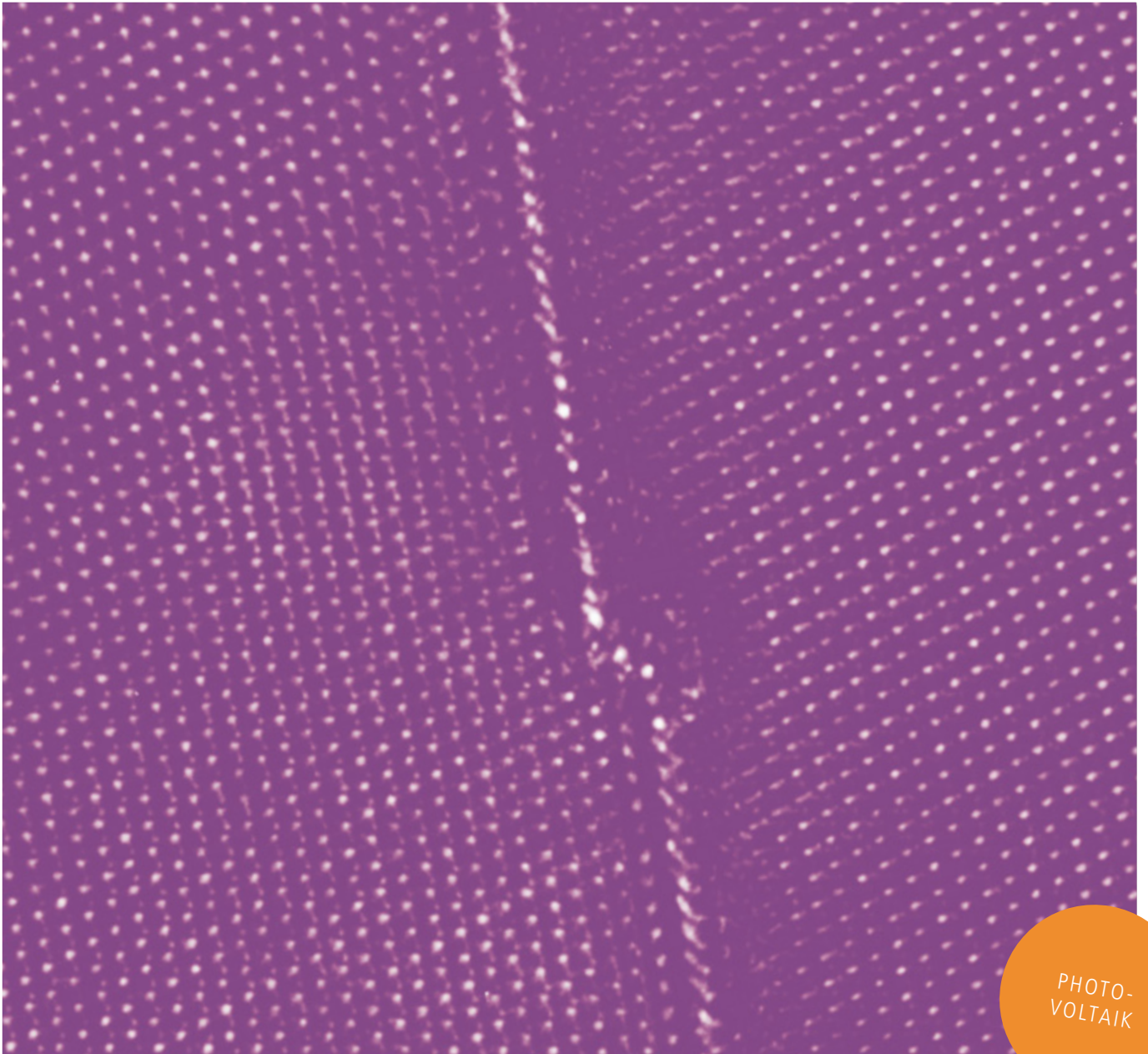


PHOTO-VOLTAIK

NANOSKOPISCHE KURZSCHLÜSSE

Ursachenanalyse an Halbleiterdefekten durch potenzialinduzierte Degradation (PID)

Solarmodule in Großanlagen sind in Reihe geschaltet, ihre Spannungen addieren sich. Durch die daraus resultierende hohe Systemspannung treten teilweise erhebliche elektrische Felder in den Solarmodulen auf. Diese können bei bestimmten klimatischen Bedingungen zur sogenannten potenzialinduzierten Degradation (PID) führen. PID geht mit dramatischen Leistungsverlusten der betroffenen Solarmodule einher und stellt ein Zuverlässigkeitsrisiko für Betreiber von PV-Anlagen dar. Im Rahmen der BMBF-Projekte Future-Fab und xμ-Module arbeitet ein Konsortium aus Industrie und Forschung an Strategien zur Vermeidung von PID in Solarmodulen.

Der zugrunde liegende Versagensmechanismus wurde lange Zeit nur auf einer

phänomenologischen Ebene analysiert. Verschiedene Faktoren wie Feuchtigkeit, Temperatur, Art der Deckgläser, spezielle Polymereigenschaften und Pufferschichten schienen den Effekt zu beeinflussen. Forscher am Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP und Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle haben degradierte Siliziumsolarzellen genauer untersucht und nanoskopische

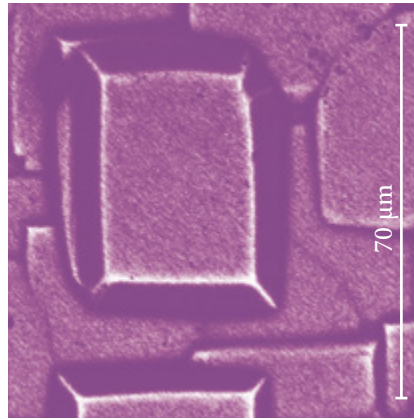
Kurzschlüsse als Ursache für die Degradation nachweisen können.

Mit hochauflösenden elektronenmikroskopischen Verfahren lassen sich die PID-Defekte auf den Solarzellen lokalisieren und Struktur und Zusammensetzung in atomaren Dimensionen analysieren. Im ersten Schritt wird die hochempfindliche elektronenstrahlinduzierte lock-in-Strommessung (EBIC) im Rasterelektronenmikroskop zum Auffinden der Defekte angewendet. Dann werden Querschnitte mittels fokussierter Ionenstrahltechnik (FIB) in den Siliziumkristall eingebracht und dünne Lamellen an der Stelle des Defekts entnommen. Schließlich zeigt die atomar aufgelöste Untersuchung mit Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) die Ursache der Kurzschlüsse: Hinter jedem PID-Defekt steckt ein Kristalldefekt.

»DURCH EIN GRUNDLEGENDES VERSTÄNDNIS DES PID-EFFEKTES AUF NANOSKOPISCHER EBENE LASSEN SICH GROSSE SOLARMODULE ZUVERLÄSSIG VOR LEISTUNGSVERLUST SCHÜTZEN.«

Diese Kristalldefekte werden als Stapelfehler bezeichnet und haben Längen von nur wenigen 100 Nanometern und Dicken von nur einer Atomlage. Die Stapelfehler liegen direkt unter der Oberfläche der Siliziumsolarzellen. Mittels hochauflösender und hochempfindlicher nano-EDX-Analytik im TEM konnte in der Stapelfehlerebene Natrium in hohen Konzentrationen nachgewiesen werden. Die Kurzschlüsse, die bei PID entstehen, werden folglich darauf zurückgeführt, dass die Stapelfehler im Siliziumkristall durch das Eindringen von Natriumatomen elektrisch leitend werden. So liegt die Vermutung nahe, dass Natriumatome in Stapelfehlern eine große Dichte elektronischer Zustände erzeugen. Die große Abbildung zeigt die atomare Struktur in

der Umgebung eines Stapelfehlers, der Natriumatome enthält. Die hantelförmigen Gebilde sind Reihen von Siliziumatomen senkrecht zur Bildebene. Die (dunkle) diagonale Linie ist der Stapelfehler, der sich durch die Unterbrechung der Fernordnung auszeichnet.



Aufnahme einer Solarzellenoberfläche mittels EBIC-Methode. Links oben ist ein PID-Kurzschlussdefekt durch lokal verringertes EBIC-Signal erkennbar.

Die Natriumionen bewegen sich unter dem Einfluss von elektrischer Spannung in die Solarzelle und dringen dort in die Stapelfehler ein. Mittlerweile haben viele Photovoltaik-Firmen erfolgreiche Strategien zur Vermeidung von PID entwickelt. Damit schließt sich der Kreis. Durch ein grundlegendes Verständnis des PID-Effektes auf nanoskopischer Ebene lassen sich große Solarmodule zuverlässig gegen schädliche Leistungsverluste schützen.

»DIE POTENZIALINDUZIERTE DEGRADATION GEHT MIT DRASTISCHEN LEISTUNGSVERLUSTEN EINHER.«

Einhergehend mit der Aufklärung der nanoskopischen Defektursachen von PID wurde am Fraunhofer CSP im Jahr 2012 ein prototypischer PID-Solarzellentester entwickelt. Der PID-Solarzellentester analysiert die speziellen elektrischen Eigenschaften der leitfähigen, Na-kontaminierten Stapelfehler. Damit wurde für die realitätsnahe Nachbildung des Aufbaus

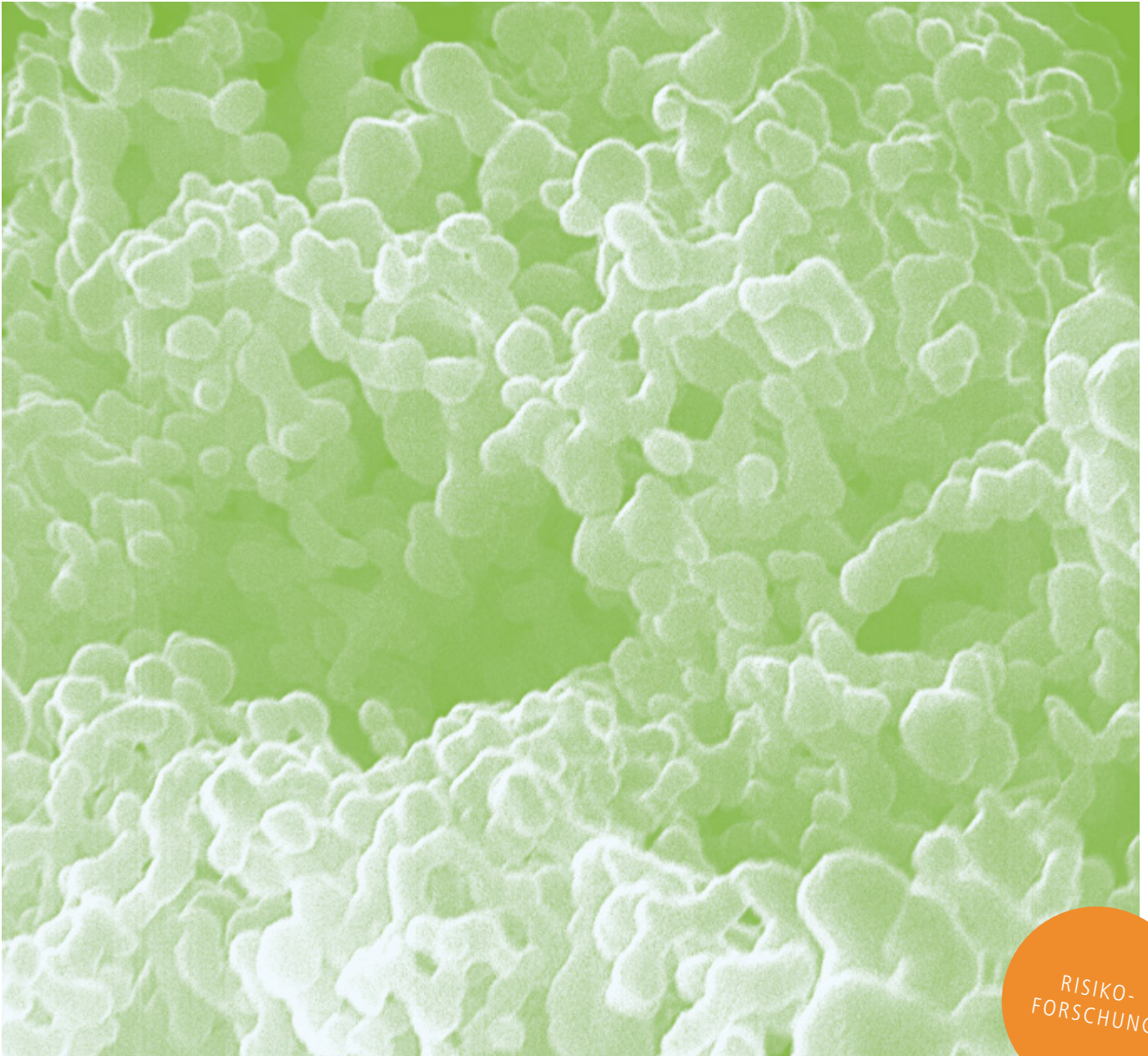
von Solarmodulen unter PID-kritischen Umgebungsbedingungen im Labormaßstab ein wichtiges Werkzeug für Forschung, Entwicklung und industrielle Qualitätskontrolle geschaffen. Der PID-Zelltester kann zur Bewertung der PID-Resistenz von Solarzellen wie auch der Materialkomponenten in Modulen eingesetzt werden. Aufgrund des neuartigen Messansatzes und der großen Bedeutung für die weltweite PV-Industrie wurde der PID-Solarzellentester zum Patent angemeldet. Mittlerweile wird er in Lizenz durch die Firma Freiberg Instruments hergestellt.

»DIE PID-DEFEKTE AUF DEN SOLARZELLEN LASSEN SICH MIT HOCHAUFLÖSENDEN ELEKTRO-NENMIKROSKOPISCHEN VERFAHREN LOKALISIEREN, DIE EINE ANALYSE DER STRUKTUR UND ZUSAMMENSETZUNG IN ATOMAREN DIMENSIONEN ERMÖGLICHEN.«

Phys. Status Solidi RRL 7, No. 5 (2013), 315–318 / DOI 10.1002/pssr.201307090, Abb. b: aus V. Naumann et al., Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.06.015>

Diese Arbeit wird gefördert von den BMBF-Projekten „xµ-Module“ (03SF0400A) im Spitzencluster Solarvalley Mitteldeutschland und „Future-Fab“ (13N11446) in der Innovationsallianz Photovoltaik.

Volker Naumann, Dr. Christian Hagedorf, Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Halle (Saale)

RISIKO-
FORSCHUNG

NANOMATERIALIEN UND REACH

Stärken und Schwächen der Europäischen Chemikalienverordnung

Nanomaterialien sind Grundlage vieler Produkte und Teil vieler technischer Prozesse, die zu einer besseren Energieeffizienz führen können. Sie sind vom Markt nicht mehr wegzudenken. Während in den meisten Fällen Nanostrukturen genutzt werden, dominiert in der Öffentlichkeit das Bild extrem kleiner und voneinander isolierter Nanopartikel. Diese seltener verwendeten Partikel

werden im industriellen Maßstab häufig „top-down“ produziert, beispielsweise durch das Mahlen gröberer Stoffe auf Dimensionen unter 100 Nanometer. Es wird befürchtet, dass diese ultrafeinen Partikel eingeatmet werden und dann die Atemwegsorgane schädigen, dass sie in ihrer Feinheit alle biologischen Barrieren überwinden, in Zellen oder Organe eindringen und dort sogar neuartige

Wirkungen („Nanoeffekte“) auslösen. Diese Besorgnis veranlasst fast alle Industriestaaten, die Europäische Union, die OECD-Staaten und die Weltgesundheitsorganisation WHO dazu, die Thematik der Nanosicherheit in ihre Agenda aufzunehmen und Sicherheitsforschung zu betreiben. Seit 2005 beteiligt sich auch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) an einer Vielzahl

von Projekten zur Aufklärung von Gesundheitsrisiken durch Nanomaterialien am Arbeitsplatz. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, dass die in der Öffentlichkeit häufig anzutreffende grundsätzliche Skepsis gegenüber allen Nanomaterialien nicht gerechtfertigt ist. Die befürchteten Nanoeffekte wurden bisher noch nicht beobachtet. Unterschätzen sollte man Nanomaterialien dennoch nicht.

»DIE SKEPSIS GEGEN- ÜBER NANOMATERIALIEN IST NICHT GERECHT- FERTIGT. BEFÜRCHTETE NANOEFFEKTE WURDEN BISHER NOCH NICHT BEOBACHTET.«

Für die Risikocharakterisierung aktuell vermarkteter Nanomaterialien lassen sich derzeit vier Gruppen unterscheiden. Die erste Gruppe bilden Nanomaterialien, bei denen bereits die Ausgangsstoffe eine bekannte spezifische Toxizität aufweisen, wie beispielsweise Schwermetalle. Zur zweiten Gruppe gehören faserförmige Nanomaterialien, die biobeständige Faserstäube freisetzen können. Zu dieser Kategorie zählen Kohlenstoffnanoröhrchen. Die dritte Gruppe bilden Nanomaterialien, die granuläre biobeständige Fein- oder Ultrafeinstäube ohne spezifische Toxizität (GBS) freisetzen können. Dazu gehören „chemisch unauffällige“ Materialien, wie Industrieruß und Titandioxid. Leicht wasserlösliche Nanomaterialien ohne Anzeichen einer signifikanten Toxizität sind der vierten Gruppe zuzuordnen. Ein Beispiel hierfür sind bestimmte Arten von Kieselsäuren. Aber auch innerhalb dieser Gruppen gibt es Unterschiede hinsichtlich der Wirkungen auf die Gesundheit.

Ein lange bekanntes Arbeitsschutzproblem ist der A-Staub, oder Alveolarstaub, dessen Bestandteile nur einige Mikrometer oder weniger messen. Durch Einatmen gelangen diese Partikel in die

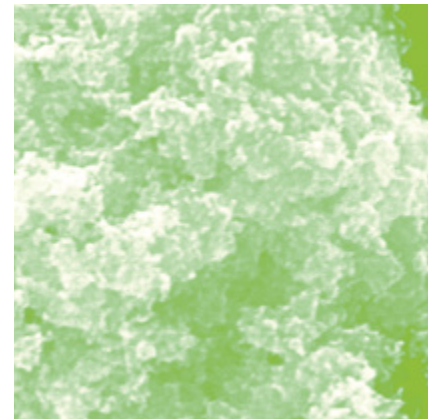
Alveolarbläschen der Lunge. Biobeständige alveolengängige Stäube verbleiben über einen längeren Zeitraum in der Lunge und können langfristig zu Entzündungen, Krebsbildung oder Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems führen. Die meisten gängigen Nanomaterialien setzen Staubpartikel frei, die aus mehr (Aggregate) oder weniger (Agglomerate) fest aneinander gebundenen Primärpartikeln bestehen und deutlich größer als 100 Nanometer sind. Nach dem Einatmen in die Lunge zerfallen diese im Regelfall nicht, sodass nur ein sehr geringer Anteil aus der Lunge in andere Organe gelangen kann.

Stäube, die aus den meisten derzeit marktrelevanten Nanomaterialien, wie beispielsweise Titandioxid, freigesetzt werden können, zählen zur Gruppe der zuvor genannten GBS. Sie wurden früher aufgrund ihrer Reaktionsträgheit als inert bezeichnet und als nicht besonders kritisch für die Gesundheit angesehen. Diese Ansicht ist jedoch inzwischen aus wissenschaftlicher Sicht überholt – nicht zuletzt durch Ergebnisse der BAuA. Granuläre biobeständige Stäube können ein erhöhtes Gesundheitsrisiko darstellen. Staubschutzmaßnahmen, wie zum Beispiel eine wirksame lokale Absaugung, sind daher für Tätigkeiten mit diesen Materialien angezeigt. Eine dermale Aufnahme ist normalerweise nicht zu befürchten. Aus der Asbestforschung ist bekannt, dass die Faserform von Partikeln mit einem besonders hohen Gesundheitsrisiko verbunden sein kann. Auf dieser

»TROTZ LÜCKEN LEISTET REACH EINEN WICHTIGEN BEITRAG ZUR SICHERHEIT.«

Grundlage wurden zum Beispiel Ende der 90er Jahre in Deutschland biobeständige Mineralwollen verboten und durch bio-lösliche Produkte mit geringem Gesundheitsrisiko ersetzt. Hieraus wird deutlich, warum die Erkenntnis, dass auch einige Formen von Kohlenstoffnanoröhrchen und -fasern alveolengängige Faserstäube

mit kritischen Dimensionen freisetzen können, weltweite Besorgnis ausgelöst hat. Der Ausschuss für Gefahrstoffe empfiehlt inzwischen für die Verarbeitung rigider (steifer) Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) strenge Arbeitsschutzmaßnahmen. Im Vordergrund sollte hier wie im Fall der Mineralwollen eine Substitution durch weniger gefährliche Materialien stehen. Hier gibt es gerade bei den CNT eine Vielzahl von Möglichkeiten. Nicht rigide Fasern, wie sie bei der Mehrzahl der zurzeit eingesetzten CNT auftreten, sind weit weniger problematisch. Hier ist nach derzeitigem Erkenntnisstand das Schutzniveau für GBS-Nanomaterialien angemessen.



*Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme
eines Zinkoxid-Nanomaterials*

Das Verstaubungsverhalten von Nanomaterialien ist ein weiterer relevanter Aspekt für die Festlegung geeigneter Schutzmaßnahmen. Entgegen erster Annahmen, dass dieses grundsätzlich als hoch zu bewerten sei, ergaben Prüfstanduntersuchungen mittels Shaker-Verfahren ein differenzierteres Bild. Es gab zwar einzelne Proben mit verstärkter Partikelfreisetzung, jedoch wiesen etliche der untersuchten kommerziellen Nanomaterialien nur eine geringe Tendenz zur Verstaubung auf.

Gerade bei den Nanomaterialien, die einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten sollen, wird von Beginn an ein hohes Maß an Chemikaliensicherheit erwartet. Dies ist mit der pragmatischen Vorgehensweise von REACH kaum zu erfüllen und führt eher zu schwierigen Diskussionen über die Anpassung der Verordnung.

Risiken für Mensch und Umwelt, die durch als A-Staub freigesetzte biobeständige Partikel verursacht werden, sind in den Prüf- und Informationsvorschriften von REACH bislang nur unzureichend abgedeckt. So sieht der Katalog der Prüfungen zwar eine Ermittlung der Korngrößenverteilung vor, die Ergebnisse dieser Tests korrelieren aber



In den meisten Nanomaterialien sind die Nanopartikel zu größeren Agglomeraten und Aggregaten verbunden

oft nicht mit den tatsächlichen Belastungen, die bei der Handhabung des Stoffes auftreten. Mittelfristig sollte aber eine Prüfpflicht für die Hersteller und Importeure zur Ermittlung des Verstaubungsverhaltens in den Katalog zur Registrierung von Stoffen aufgenommen und verbindlich zugeordnet werden. Die EU-Nanodefinition ist mit einem Schwellenwert von 100 Nanometern pragmatisch gewählt und liefert keine geeignete Abgrenzung mit Bezug auf den Schutz vor alveolargängigen Partikeln aus Nanomaterialien, die eine Größen dimension von bis zu mehreren Mikrometern aufweisen können. Im Arbeitsschutz etablierte Definitionen für A-Staub und kritische Fasern erscheinen für spezifische Prüf- oder Informationsanforderungen unter REACH besser geeignet.

Aufgrund der sicherlich noch zunehmenden Vielfalt von Nanomaterialien und einer weiterhin intensiven Sicherheitsforschung empfiehlt die BAuA gemeinsam mit anderen Ressortforschungseinrichtungen des Bundes trotzdem eine vorsorgliche Aufnahme der EU-Nanodefinition in die relevanten Anhänge der REACH-Verordnung. Dies ermöglicht dann eine schnelle Reaktion auf neuartige

gesundheitliche Wirkungen und die Einführung spezifischer Prüf- und Informationsanforderungen. Es ist aber wichtig, die Nanomaterialien nicht pauschal mit gegenüber anderen Stoffen erhöhten Prüf- und Informationsanforderungen zu stigmatisieren.

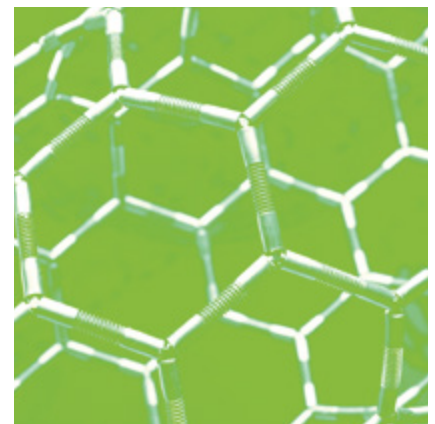
Ein weiteres Defizit von REACH ist das weitgehende Fehlen einer spezifischen Informations- und Prüfstrategie zur Abklärung einer kanzerogenen Wirkung freigesetzter Fasern. Asbest würde als neues Material unter REACH gar nicht oder erst sehr spät als Stoff mit besonderer Besorgnis erkannt! Im Hinblick auf die Chemikaliensicherheit besteht hier erheblicher Nachbesserungsbedarf. In den letzten 30 Jahren wurden auf Grundlage des von Pott und Stanton entdeckten Prinzips zur Faserkanzerogenität sensible Testsysteme entwickelt. Demzufolge ist es geboten, faserförmige Stoffe in puncto Freisetzung von Fasern mit kritischen Dimensionen (WHO-Fasern) und einer relevanten Biobeständigkeit zu überprüfen, damit REACH seiner Zielstellung auch gerecht werden kann.

»NANOMATERIALIEN SOLLTEN AUFGRUND ERHÖHTER PRÜF- UND INFORMATIONSANFORDERUNGEN NICHT PAUSCHAL STIGMATISIERT WERDEN.«

Auch wenn die REACH-Verordnung noch einige Lücken aufweist und Nachbesserungsbedarf besteht, leistet sie dennoch durch die Bereitstellung gesicherter Gefährdungs- und Maßnahmeninformationen und einer engen Begrenzung der Verbreitung von Stoffen mit hoher Besorgnis einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit von Arbeitnehmern und Verbrauchern.

Die Diskussion zu Grenzwerten für einzelne Nanomaterialien am Arbeitsplatz ist noch nicht abgeschlossen. Das Einfache

Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (EMKG), das jetzt auch als App für Smartphones und Tablets heruntergeladen werden kann, hilft hier bei der Auswahl geeigneter Schutzmaßnahmen weiter. Pragmatisch sollte die Gefährlichkeitsgruppe B, die einer Einstufung als „gesundheitsschädlich beim Einatmen“ entspricht, als „Default“ verwendet werden, für neu entwickelte Nanomaterialien ist die Gefährlichkeitsgruppe C angezeigt und entspricht den Vorgaben des technischen Regelwerkes.



Sechseckige Waben bilden die Grundstruktur von Kohlenstoffnanoröhrchen

Änderungen im Arbeitsschutzrecht, die beispielsweise die Einführung einer rechtlichen Definition von Nanomaterialien umfassen, sind derzeit nicht erforderlich. Die größte Herausforderung besteht jedoch darin, Wissenschaftler in Forschungseinrichtungen und Startup-Unternehmen immer wieder zu sensibilisieren und so einen bewussten Umgang mit Nanomaterialien zu erreichen. Die Bewertung der Gesundheitsrisiken durch Nanomaterialien am Arbeitsplatz ist, wie für viele andere chemische Stoffe auch, noch von erheblichem Nichtwissen geprägt. Daher ist eine konsequente Anwendung des Vorsorgeprinzips erforderlich, um die innovativen Stärken der Nanotechnologien nicht zu gefährden.

Dr. Rolf Packroff, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fachbereich „Gefahrstoffe und biologische Arbeitsstoffe“, Dortmund

PHOTO-VOLTAIK

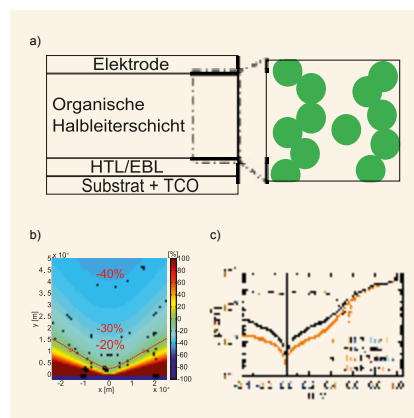
ORGANISCHE SOLARZELLEN

Mehr Effizienz durch reduzierte Coulomb-Interaktion

Die Entwicklung organischer Photovoltaik hat über die letzte Dekade hinweg große Fortschritte gemacht und ermöglicht inzwischen Konversionseffizienzen von Licht in Strom von bis zu zwölf Prozent.

Ein wichtiger Aspekt wurde jedoch weitgehend vernachlässigt: die niedrige Permittivität (ϵ_r) organischer Halbleiter mit Werten von $\epsilon_r \sim 3 - 4$. Der Effekt einer niedrigen Materialpermittivität ist eine erhöhte Coulomb-Interaktion in organischen Halbleiterdünnschichten zwischen komplementären Ladungsträgern. Dies resultiert unter anderem in hohen Exzitonenbindungsenergien von bis zu 1.4 eV, begrenzten Ladungsträgertransporteigenschaften sowie erhöhter, nicht-geminaler Rekombination. Die Konsequenz des Vernachlässigens dieser Materialeigenschaft ist eine starke Limitierung in der theoretisch erreichbaren Konversionseffizienz von ~ 100 Prozent.

Im Institute of Technology for Nanostructures an der Universität Duisburg-Essen wird deshalb an einem Konzept gearbeitet, das das effektive ϵ_r organischer Dünnschichten durch die Integration elektrisch isolierender high-k-Nanostrukturen erhöht und



a) Schematischer Probenaufbau für high-k-OPV
b) Relative Fluchtenergieänderung durch effektiv erhöhte Dünnschichtpermittivität
c) Umgesetztes high-k-Konzept für P3HT:PCBM-Solarzellen.

so höhere Konversionseffizienzen durch reduzierte Coulomb-Interaktion in organischen Solarzellen ermöglicht. Ein schematischer Probenaufbau ist beispielhaft für integrierte high-k-Nanopartikel in Teilabbildung a) dargestellt. Der Einfluss der resultierenden high-k/Organik-Grenzfläche auf die Coulomb-Wechselwirkung im Vergleich zu einer rein organischen Umgebung ist in Teilabbildung b) als relative Änderung in der Fluchtenergie gezeigt. Diese ist notwendig, um eine

Testladung aus dem Umfeld einer stationären Ladung zu entfernen. Es wird deutlich, dass durch die Integration des high-k-Materials die Fluchtenergie stark reduziert werden kann. Der in der Darstellung scheinbar widersprüchliche Anstieg in der Fluchtenergie in der direkten Umgebung der Grenzfläche ist der Wechselwirkung mit dem high-k-Material geschuldet. Solange jedoch ein Ladungstransport entlang dieser Grenzfläche möglich ist, stellt dieser Umstand keine Limitierung für das Konzept dar. Erste Machbarkeitsexperimente mit organischen P3HT:PCBM-Solarzellen, mit und ohne integrierte SrTiO_3 -Nanopartikel ($\epsilon_r \sim 300$), zeigen eine eindeutige Konversionseffizienzsteigerung um ~ 17 Prozent (Teilabbildung c)) für Bauteile mit effektiv erhöhter Permittivität. Weiterführende Untersuchungen machen deutlich, dass dieses Resultat nicht auf Morphologiefekte oder veränderte Lichteinkopplung zurückzuführen ist, sondern als Resultat eines effektiv erhöhten ϵ_r verstanden werden kann.

Dr. Niels Benson, Institute of Technology for Nanostructures (NST), Universität Duisburg-Essen



Fotos: ©istockphoto.com(1), Stefan Wippermann(2)

PHOTO-VOLTAIK

SILIZIUM-HOCHDRUCK-NANOKRISTALLE

Multiple Exzitonengeneration für die Photovoltaik

Die Verwendung von Silizium-Nanokristallen mit Kernen aus Si-Hochdruckphasen als Lichtabsorber könnte die Effizienz von Solarzellen mittels multipler Exzitonengeneration (MEG) deutlich steigern.

Solarzellen der kommenden 3. Generation streben Wirkungsgrade jenseits des Shockley-Queisser-Limits von 33,7 Prozent für die solare Energieumwandlung

an. Eine vielversprechende Möglichkeit, das Shockley-Queisser-Limit zu umgehen, bietet die sogenannte multiple Exzitonengeneration (MEG). Dabei erzeugt ein einzelnes Photon zunächst ein weit über die Bandkanten hinaus angeregtes Elektronen-Loch-Paar, das anschließend in mehrere Elektronen-Loch-Paare zerfällt. Diese Form der Relaxation hochangeregter Exzitonen an die Bandkanten mittels MEG

wird durch die Coulomb-Wechselwirkung vermittelt. Anders als Volumen-Materialien, in denen die MEG durch die Abschirmung der Coulomb-Wechselwirkung weitgehend unterdrückt wird, zeigen Nanokristalle mit einem Durchmesser von bis zu 10 nm effiziente MEG.

Der Einschluss der Ladungsträger in den kleinen Volumina der Nanokristalle, auch

als Quantum Confinement bezeichnet, steigert die Coulomb-Wechselwirkung und reduziert deren Abschirmung. Das Quantum Confinement ist jedoch nicht nur eine notwendige Voraussetzung für effiziente MEG, sondern vergrößert gleichzeitig die Bandlücke der Nanokristalle. Dieser Anstieg der Bandlücke mit sinkendem Radius der Nanokristalle erreicht typischerweise eine Größenordnung von mehreren eV. Die Schwellenenergie, bei der die MEG einsetzt, liegt experimentell bei der zwei- bis dreifachen Energie der Bandlücke. Demzufolge ist die MEG innerhalb des Sonnenspektrums mit gängigen Halbleitermaterialien nahezu unerreichbar.

Erwünscht ist die Verwendung von Silizium-Nanostrukturen für MEG-basierte Solarzellen insbesondere deshalb, da Si eine niedrige MEG-Schwellenenergie bei hohen MEG-Raten aufweist, aber auch aufgrund seiner technologischen Reife, der breiten Verfügbarkeit und der toxikologischen Unbedenklichkeit. Die elektronischen Bandlücken konventioneller Si-Nanokristalle mit Diamant-Struktur sind jedoch erheblich zu groß. Gesucht werden daher Si-Nanokristalle, die gleichzeitig kleine Bandlücken und effiziente MEG aufweisen.

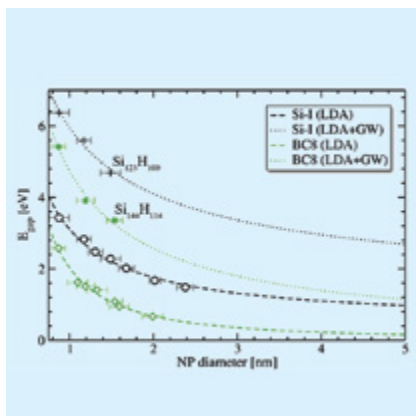


Abb. 1: Elektronische Bandlücken H-terminierter Si-Nanokristalle mit Si-I- und BC8-Kernen als Funktion des Durchmessers, berechnet mittels Dichtefunktionaltheorie mit und ohne Quasiteilchenkorrekturen in GW-Näherung.

Si existiert in einer Reihe teils metastabiler Hochdruckphasen und Allotrope. Eine dieser Phasen, bekannt als BC8 oder Si-IV, ist metastabil unter Umgebungsbedingungen, ähnlich wie Diamant eine metastabile

Hochdruckphase des Kohlenstoffs ist. Si-BC8 ist als Volumenmaterial ein Halbmetall. In Si-Nanokristallen mit BC8-Struktur öffnet das Quantum Confinement jedoch kleine Bandlücken. Abb. 1 zeigt die Bandlücke als Funktion des Durchmessers für wasserstoffterminierte Si-Nanokristalle mit Kernen in Diamant- und BC8-Struktur. Si-BC8-Nanokristalle weisen systematisch eine erheblich kleinere Bandlücke als Si-I-Nanokristalle auf. Die Berechnung der Bandlücken erfolgte mittels Dichtefunktionaltheorie (DFT) und Quasiteilchenkorrekturen in GW-Näherung. Die Quasiteilchenbandlücken stellen eine obere Schranke für die tatsächliche Bandlücke dar, da die Bandlücke verringernde Effekte, wie beispielsweise exzitonsche Bindungsenergie, Oberflächenrekonstruktion, Symmetriebrechung und Verspannungen, nicht berücksichtigt wurden.

»NANOKRISTALLE MIT KERNEN AUS SI-HOCHDRUCKPHASEN ZEIGEN EFFIZIENTE MEG.«

Um zu überprüfen, ob diese Si-Nanokristalle mit kleinen Bandlücken noch immer eine effiziente MEG aufweisen, wurden die Zerfallsraten der anfänglich hochangeregten Photoexzitonen zu Biexzitonen mittels Fermis Goldener Regel berechnet. Dabei wurden die Exzitonen- und Biexzitonen-Zustände als einfach und zweifach angeregte Slater-Determinanten angenähert. Die dielektrische Abschirmung wurde durch die Berechnung des frequenzabhängigen dielektrischen Tensors in „random phase approximation (RPA)“ mittels iterativer Methoden berücksichtigt. Tatsächlich weisen Nanokristalle mit Kernen aus Si-Hochdruckphasen trotz kleiner Bandlücken eine effiziente MEG auf. Wie in Abb. 2 gezeigt, führt die bei einem Durchmesser von $d = 1,2$ nm um 1,3 eV kleinere Bandlücke der BC8-Nanokristalle zu einer Rotverschiebung der MEG-Rate um 2 eV. Nahe des Einsetzens der MEG weisen Si-BC8-Nanokristalle damit eine um eine

Größenordnung höhere MEG-Rate auf als Si-I-Nanokristalle gleicher Größe.

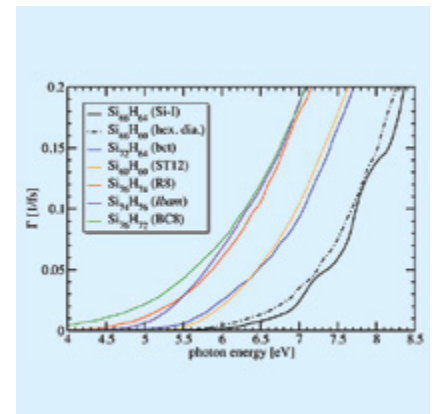


Abb. 2: MEG-Raten für Nanokristalle mit Kernen aus verschiedenen Si-Phasen bei einem Durchmesser von $d = 1,2$ nm.

Aktuelle Experimente demonstrieren die Erzeugung von Si-BC8-Nanokristallen im Labor, beispielsweise mittels Laserablation, Nanoindentation oder auch durch Kurzzeit-Tempnen in Si/SiO₂-Supergittern. Eine hochinteressante Möglichkeit bietet außerdem die vor kurzem gezeigte chemische Bottom-Up-Synthese von Si-BC8-Nanokristallen in organischen Lösungsmitteln, ausgehend von Prekursor-Molekülen. Da auf diesem Wege direkt die BC8-Struktur bei Umgebungsbedingungen synthetisiert wird, ist eine Transformation von Si-I zu BC8 mittels hohem Druck, wie in den zuvor genannten Experimenten, nicht erforderlich. Die thermische Stabilität solcher Nanokristalle besteht bis jenseits 400 °C. Auf der Basis von Si-Nanokristallen mit Kernen aus metastabilen Hochdruckphasen könnte somit erstmals die Erzeugung eines Materials gelingen, das eine effiziente MEG innerhalb des Sonnenspektrums aufweist.

Dieses Projekt wird ab Januar 2014 im Rahmen einer BMBF „NanoMatFutur“-Nachwuchsgruppe gefördert (Kennzeichen 13N12972).

Dr. Stefan Wippermann,
Grenzflächenchemie und
Oberflächentechnik,
Max-Planck-Institut für Eisen-
forschung GmbH, Düsseldorf

KATALYSE

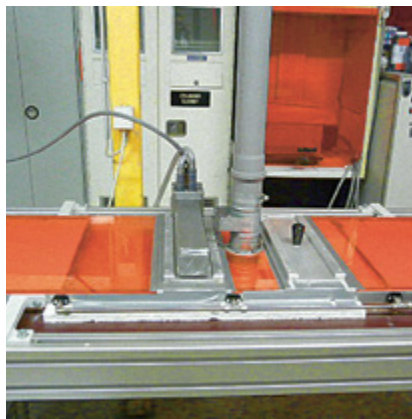
NYLON ALS KATALYSATORTRÄGER

Nanometerdicke Schicht auf Textil eröffnet neues Verfahren

Margarine, Düngemittel oder Schmerztabletten: Schätzungsweise 80 Prozent aller chemisch erzeugten Produkte entstehen mithilfe von Katalysatoren. Eine neue Methode ermöglicht die Wiederverwendung organischer Katalysatoren. Nylon spielt dabei eine wichtige Rolle.

Je nach vermittelter Reaktion weisen Katalysatoren unterschiedliche Zusammensetzungen und Formen auf: vom komplizierten Eiweißmolekül im Körper, dem Enzym, über das robuste Bauteil auf Edelmetall-Basis im Auto bis hin zu pulverförmigen oder flüssigen Substanzen, die zu laufenden Prozessen hinzugefügt werden. In der sogenannten „homogenen Katalyse“, die beispielsweise in der Pharmaindustrie häufig genutzt wird, liegen sowohl die Katalysatorsubstanzen als auch die Ausgangsstoffe in gleicher Form vor, zum Beispiel beide gelöst in einer Flüssigkeit.

Nun wird ein Katalysator während der Reaktion, die er vermittelt, nicht aufgebraucht. Das Resultat ist daher immer eine Mischung aus dem gewünschten Produkt und den Katalysatorsubstanzen. Letztere



Fasergebundene Biokatalysatoren bei der Arbeit

müssen aufwendig separiert werden oder bleiben – wenn sie günstig sind und sich nicht nachteilig auswirken – im Produkt.

Eine praktischere Alternative zu den gängigen Verfahren bietet Nylon, wie es auch für Feinstrumpfhosen genutzt wird. Es dient als Trägermaterial für organische Katalysatoren in Molekülform. Dazu werden Textil und Moleküle mit UV-Licht bestrahlt. Infolge binden sich die Katalysatoren kovalent an die Nyloboberfläche. So ergibt sich eine Oberfläche, die mit einer etwa 5 bis 10 Nanometer

dicken, fest anhaftenden Schicht aktiver Moleküle besetzt ist. Nicht gebundene Katalysatoren können einfach wieder abgewaschen und beim nächsten Mal wiederverwendet werden.

Das textile System hat zwei entscheidende Vorteile: Erstens lassen sich die Katalysatoren problemlos am Nylon aus dem Produkt herausziehen und sofort wiederverwenden. Zweitens bleibe keine Rückstände der Katalysatoren im Produkt zurück. Das kann gerade in Anwendungen, in denen es auf hochreine Wirkstoffe ankommt, enorm wichtig sein. Auf die katalytische Aktivität hat die Fixierung übrigens keinen Einfluss. Nach 250 Zyklen konnte keine nennenswerte Veränderung in der durchweg hohen Leistung festgestellt werden. Auch die Katalysatormenge auf dem Textil ist unproblematisch einzustellen: Je dünner die Nylonfasern, desto größer die Oberfläche, die für Bindungen zur Verfügung steht.

Prof. Dr. Jochen Gutmann,
Deutsches Textilforschungszentrum
Nord-West e. V., Krefeld



02.–04. DEZ. 2013

**LAS VEGAS, USA
NANOTEK AND EXPO**

Auf der dritten internationalen Conference on Nanotek and Expo in Las Vegas äußern sich hochkarätige Wissenschaftler aus aller Welt zu Themen der Nanotechnologie und vielversprechenden Innovationen. Entdeckungen unter anderem in den Bereichen Graphen, Carbon Nanotubes, Katalysatoren, Kompositstoffe, photofunktionale organische Partikel oder Produktionsansätze sollen zahlreiche Besucher anziehen. www.nanotechia.org/events/nanotek-2013



04.–06. DEZ. 2013

**CHIBA, JAPAN
SEMICON JAPAN 2013**

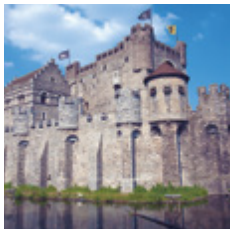
Die Semicon Japan in Chiba/Tokyo ist die weltweit führende Fachmesse für Halbleitertechnik. Neben bereits etablierten Produkten und Technologien wartet sie mit einer Vielzahl von Neuheiten in den Bereichen Photovoltaik, Messtechnik, MEMs, LEDs, gedruckte und flexible Elektronik, Anlagenbau, Wafer-Reinigung, Laser, 3D-Video, Mikroskope, Wärmesensoren und Materialien auf. www.semiconjapan.org/en



11.–12. DEZ. 2013

**EDE, NIEDERLANDE
MICRONANO CONFERENCE '13**

Diesmal öffnet die jährliche MicroNano Conference ihre Tore in Ede. Sie verbindet Industrie, Politik und Wissenschaft in den Bereichen Mikrosysteme und Nanotechnologie. Das breite Themenspektrum ermöglicht den Informationsaustausch zu Grundlagenforschung, Risikoforschung, Materialwissenschaft und Umsetzung oder Ausrüstung im Kontext industrieller Anwendungsmöglichkeiten. www.micronanoconference.nl



15.–17. JAN. 2014

**GENT, BELGIEN
INTERSOLUTION 2014**

Gent ist 2013 Schauplatz der fünften Fachmesse für Solarenergie in den Benelux-Ländern, die eine Übersicht über Produktsysteme und deren Anwendungen bietet. Interessierte Besucher aus den Bereichen Architektur, Bauwesen, Planung, Energieberatung sowie Vertreter der Energiekonzerne und kommunaler Einrichtungen haben die Möglichkeit, sich zu informieren und auszutauschen. www.intersolution.be/de



25.–27. MÄRZ 2014

**DÜSSELDORF, DEUTSCHLAND
ENERGY STORAGE 2014**

Auf der internationalen Konferenz und Ausstellung zu erneuerbaren Energien treffen Stadtwerke und Energieversorger auf Industrie und Forschungseinrichtungen, um marktfähige Anwendungen zu optimieren und die Umsetzbarkeit neuer Konzepte kritisch zu hinterfragen. Ziel ist es, Ansätze und Anwendungen darzustellen und ihre Bedeutung für ein zukunftsfähiges Gesamtsystem zu diskutieren. www.energy-storage-online.de



06.–09. MAI 2014

**TOLOUSE, FRANKREICH
GRAPHENE CONFERENCE**

Zum vierten Mal lädt in Toulouse die größte europäische Fachkonferenz zum Thema Graphen ein, sich über aktuelle Trends zu informieren. Neben industriellen Ausstellern berichten renommierte Redner über innovative Einsatzmöglichkeiten von Graphen, zum Beispiel in nanoelektromechanischen Systemen. Interessierte Redner werden gebeten, ihr Abstract bis zum 3. Februar 2014 einzureichen. www.grapheneconf.com

CENIDE

Die Dimension des milliardstel Meters ist so unvorstellbar klein, dass in ihr andere physikalische Gesetze herrschen als in der uns vertrauten Welt – Gold in der Nanodimension ist rot, Eisennanopartikel sind so reaktiv, dass sie sich selbst entzünden. Dies sind nur zwei Beispiele von vielen. Deshalb bietet die Nanotechnologie die Möglichkeit, in vermeintlich lange bekannten Materialien neue Eigenschaften zu entdecken und diese zu nutzen. Die Einsatzbereiche der Nanotechnologie sind nahezu unbegrenzt und erstrecken sich von der Energietechnik über die Materialwissenschaften bis hin zur Medizin.

Das »Center for Nanointegration Duisburg-Essen«, kurz CENIDE, vertritt den entsprechenden Forschungsschwerpunkt der Universität Duisburg-Essen (UDE): Seit 2005 vernetzt es die Forschungs- und Lehraktivitäten, die sich mit der Nanodimension beschäftigen, in den Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie in der Medizin. Kurz gesagt: CENIDE ist die Gemeinschaft der Nano-Forscher an der UDE – das Know-how von mehr als 50 Arbeitsgruppen unter der Leitung ausgewiesener Experten trifft hier zusammen. Kooperationen mit externen Mitgliedern, die ähnliche Forschungsansätze verfolgen, stärken das Kompetenzspektrum. Einer der Schwerpunkte der CENIDE-Forschung ist die Nanoenergie – der Einsatz der Nanotechnologie für energietechnische Anwendungen. Mit dem Forschungsbau »NanoEnergieTechnikZentrum, NETZ« wurde im Februar 2013 ein bisher einzigartiger Komplex für die Verknüpfung von Grundlagenforschung und anwendungsbezogener Weiterverarbeitung für die Energietechnik eröffnet: In den »linked facilities«, also in direkt miteinander verbundenen Laboren von Ingenieuren, Chemikern und Physikern, werden Nanomaterialien hergestellt, erforscht und unmittelbar für energietechnische Anwendungen weiterverarbeitet.

Als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der UDE und Konsortialpartner des Clusters NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW gestaltet CENIDE die Projekte und Ziele der Nanoforschung in NRW maßgeblich mit.

Kontakt

Birte Vierjahn | NanoEnergieTechnikZentrum | Universität Duisburg-Essen
Forsthausweg 2 (Post) | Carl-Benz-Str. 199 (Besucher) | 47057 Duisburg
Tel.: +49 203 379-8176 | E-Mail: cenide@uni-due.de | www.cenide.de



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Ziel2.NRW
Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung

Ministerium für Innovation,
Wissenschaft und Forschung
des Landes Nordrhein-Westfalen

