

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 02/16

ZOOM

Sind millionstel
Millimeter
der Maßstab
der Zukunft?

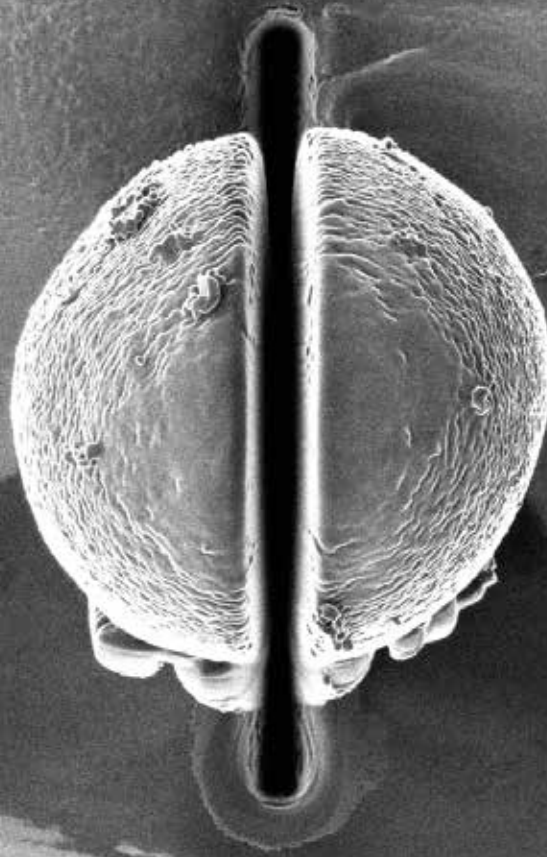
Der stärkste Beschleuniger
der Milchstraße

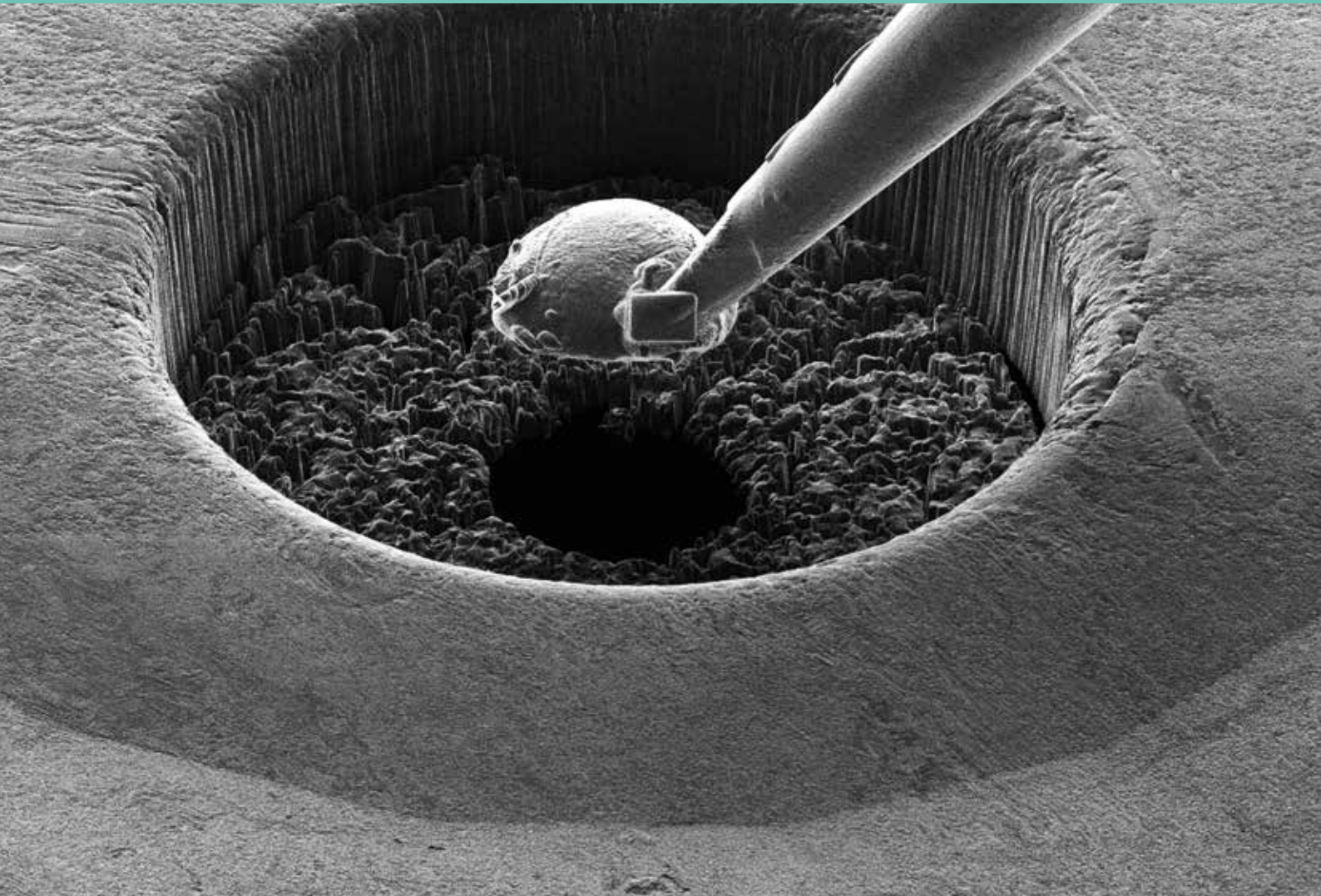
Molekültrick überlistet
Krankenhauskeime

Hinweise auf ein
neues Teilchen?



femtoskop





Fokussierter Ionenstrahl bearbeitet Materialien mit Nanometer-Genauigkeit

Mit einem feinen Ionenstrahl lassen sich Materialien auf wenige Nanometer (millionstel Millimeter) genau bearbeiten wie mit einer Mikrofräse. Ein Anwendungsbeispiel ist das Präparieren winziger Diamantstempel, zwischen denen Proben für Ultrahochdruck-Experimente eingeklemmt werden können. Dazu wird eine wenige Mikrometer (tausendstel Millimeter) große Diamantkugel in der Mitte durchgeschnitten, und beide Hälften werden umgekehrt in der Druckzelle montiert (Fotos). Zwischen den beiden umgedrehten Halbkugeln

wird dann die Probe platziert. So lässt sich ein millionenfacher Atmosphärendruck erzeugen.

Im DESY-NanoLab wird eine solche Ionenfeinstrahlanlage gemeinsam mit der Universität Bayreuth betrieben. Die Anlage kann nicht nur Probenoberflächen hochpräzise auf der Nanometerskala zurechtschneiden, sondern auch mikroskopische Defekte, Risse oder punktuelle Korrosionsstellen unter der Oberfläche von Materialien untersuchen. Die Kombination mit einem Elektronenmikroskop macht sie für viele Anwendungsbereiche etwa aus der Nanotechnologie, den Materialwissenschaften und der Biologie interessant.

Inhalt

ZOOM

NANO

Sind millionstel
Millimeter
der Maßstab
der Zukunft?

NANO

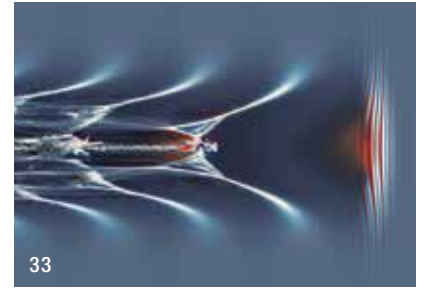
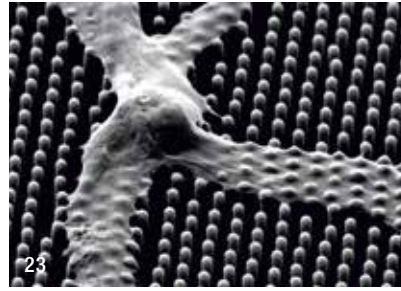
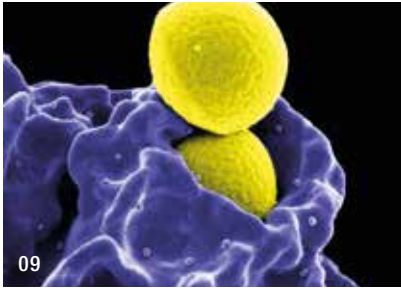
ZOOM

NANO

Sind millionstel Millimeter
der Maßstab der Zukunft?

Seite 12–29

Nano ist ein Schlagwort, das fast jeder kennt. Und Nano ist klein – sehr klein sogar: Ein Nanometer entspricht einem Millionstel eines Millimeters. Materie im Nano-Maßstab hat andere physikalische und chemische Eigenschaften als ihr Pendant mit Zentimeter- oder Meterabmessungen. An DESYs Röntgenlichtquellen lassen sich Nanowerkstoffe atomgenau durchleuchten und ihre Eigenschaften für verschiedene Anwendungen maßschneidern.



CAMPUS

- 06 Der stärkste Teilchenbeschleuniger der Milchstraße**
Gammastrahlen verraten galaktisches „Pevatron“
- 09 Maßgeschneiderte Wirkstoffe überlisten Krankenhauskeime**
Vielversprechender Ansatz gegen resistente Bakterien
- 34 Hinweise auf ein neues Teilchen?**
Auffällige „Beule“ in den Messdaten des LHC
- 36 Mathematik macht Moleküldynamik sichtbar**
Rechenverfahren vervielfacht Zeitauflösung an Röntgenlasern
- 39 Was treibt den Geodynamo an?**
Eisen unter Hochdruck

ZOOM

- 12 Nano**
Sind millionstel Millimeter der Maßstab der Zukunft?
- 14 Nano ganz groß**
Warum die „Zwerge“ bei DESY Furore machen
- 23 Die Mischung macht's**
Das Center for Hybrid Nanostructures
- 24 Der Boom der Nanoforschung**
Die Möglichkeiten der winzigen Nanoteilchen sind riesig
- 28 Brillantring für die Nanoforschung**
PETRA IV: ein neues 3D-Röntgenmikroskop

SPEKTRUM

- 30 Forschung kurzgefasst**
- Gamma-Astronomie-Zentrum
 - Helmholtz-Preis für Forschung an FLASH
 - Livebilder von Materialspannungen
 - Erster Undulator im European XFEL
 - Atombewegungen in Biosensor
 - Helmholtz Innovation Lab
 - Erster Elektronenstrahl aus Plasma-Beschleuniger

RUBRIKEN

- 02 femtoskop**
Ionenstrahl als Mikrofräse
- 15 femtopolis**
Klein, kleiner, am kleinsten

- 33 femtomenal**
Geisterhaft!
- 40 femtocartoon**
Nicht jede Beule ist ein Ereignis

Der stärkste Teilchenbeschleuniger der Milchstraße

Die kraftvollsten Teilchenbeschleuniger baut die Natur: Aus dem Kosmos hageln Elementarteilchen in die Erdatmosphäre, die noch hundert- bis hunderttausendmal mehr Energie haben als jeder irdische Beschleuniger ihnen verleihen könnte. Über die genaue Herkunft dieses energiereichen Teilchenhagels aus dem All, der sogenannten kosmischen Strahlung, rätseln Physiker seit der Entdeckung des Phänomens vor mehr als 100 Jahren. Verschiedene kosmische Objekte wurden bereits als natürliche Teilchenbeschleuniger identifiziert. Jetzt haben Forscher mit dem Gammastrahlen-Observatorium H.E.S.S. den stärksten Beschleuniger in unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, lokalisiert.

Im Zentrum der Milchstraße haust ein gigantisches Schwarzes Loch. Die Wissenschaftler des H.E.S.S.-Observatoriums (High Energy Stereoscopic System) in Namibia haben rund um dieses Schwerkraftmonster intensive Gammastrahlung äußerst hoher Energie beobachtet. „Wir haben einen astrophysikalischen Beschleuniger lokalisiert, der Protonen auf Energien von bis zu einem Peta-Elektronenvolt beschleunigt“, sagt Christian Stegmann, Leiter des DESY-Standorts Zeuthen und bis vor kurzem H.E.S.S.-Sprecher.

„Wir haben einen astrophysikalischen Beschleuniger lokalisiert, der Protonen auf Energien von bis zu einem Peta-Elektronenvolt beschleunigt“

Christian Stegmann, DESY

Ein Peta-Elektronenvolt (PeV) ist mehr als hundertmal so viel, wie der größte von Menschenhand gebaute Teilchenbeschleuniger erreicht, der Large Hadron Collider (LHC) am Genfer Teilchenforschungszentrum CERN, der ebenfalls Protonen beschleunigt. Die Forscher haben damit erstmals innerhalb der Milchstraße eine Quelle kosmischer Strahlung mit Peta-Elektronenvolt-Energie identifiziert. Bei diesem galaktischen „Pevatron“ handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um das supermassive Schwarze Loch selbst.

Auf den Spuren der Gammastrahlung

Seit mehr als zehn Jahren kartographiert H.E.S.S., das von 150 Wissenschaftlern aus zwölf Ländern betrieben wird, das Zentrum der Milchstraße im Licht höchstenergetischer Gammastrahlung. Kosmisches Gammalicht wird von hochenergetischen Protonen, Elektronen und Atomkernen der kosmischen Strahlung erzeugt, die an verschiedenen Orten des Universums beschleunigt werden. Wo diese natürlichen Beschleuniger liegen, ist nicht leicht zu erkunden. Das Problem: Die Teilchen sind elektrisch geladen und werden deshalb in interstellaren Magnetfeldern von ihrer geraden Bahn abgelenkt. Aus diesem Grund zeigt ihre Flugrichtung nicht auf ihren Produktionsort zurück.

Allerdings treffen die Teilchen der kosmischen Strahlung in der Nähe ihrer Quellen häufig auf interstellares Gas oder auf Photonen (Lichtteilchen). Dabei wird hochenergetische Gammastrahlung produziert, die nicht von Magnet- >>

Die Spiegelteleskope des H.E.S.S.-Observatoriums in Namibia vor dem Sternenhimmel der Milchstraße

feldern abgelenkt wird und daher die Erde auf geradem Weg erreicht. Diese Gammastrahlung nutzen die Forscher des H.E.S.S.-Observatoriums, um die Quellen der kosmischen Strahlung am Himmel sichtbar zu machen.

Wenn Gammastrahlung auf die Erdatmosphäre trifft, produziert sie kurze bläuliche Lichtblitze, die nachts von großen Spiegelteleskopen mit schnellen Lichtsensoren erfasst werden können. Mit dieser Technik wurden in den vergangenen Jahrzehnten mehr als 100 Quellen hochenergetischer Gammastrahlung am Himmel entdeckt. H.E.S.S. ist das zurzeit empfindlichste Instrument für diesen Nachweis.

Bisher war bekannt, dass kosmische Strahlung mit Energien bis zu etwa 100 Tera-Elektronenvolt (TeV) in der Milchstraße erzeugt wird, etwa durch die Überreste von Supernova-Explosionen oder schnell rotierende Neutronensterne, sogenannte Pulsare. Jedoch legen theoretische Argumente und die direkte Vermessung der kosmischen Strahlung nahe, dass ihre Teilchen in unserer Galaxie bis zu Energien von mindestens 1000 TeV, also 1 PeV, beschleunigt werden sollten. Doch während in den vergangenen Jahren zahlreiche extragalaktische Quellen entdeckt wurden, die kosmische Strahlung zu Multi-TeV-Energien beschleunigen, blieb die Suche nach den Beschleunigern der höchstenergetischen kosmischen Strahlung in unserer Galaxie bislang erfolglos.

Das galaktische Pevatron

Die detaillierten Beobachtungen des Zentrums der Milchstraße mit den H.E.S.S.-Teleskopen liefern jetzt erste Antworten. Bereits während der ersten Beobachtungsjahre ab 2002 hatte H.E.S.S. diffuse höchstenergetische Gammastrahlung im galaktischen Zentrum nachgewiesen. Die Beobachtung dieser diffusen Strahlung, die sich über eine Region von etwa 500 Lichtjahren Durchmesser erstreckt, war bereits ein deutlicher Hinweis auf eine Quelle kosmischer Strahlung in dieser Region. Die Quelle selbst konnten die Forscher seinerzeit jedoch noch nicht eindeutig identifizieren. Da knüpft die neue Untersuchung an: „Die deutlich größere Menge an Beobachtungsdaten und Fortschritte in den Analysetechniken haben es erlaubt, zum ersten Mal sowohl die räumliche Verteilung als auch die Energie der kosmischen Strahlung im galaktischen Zentrum zu vermessen“, sagt Aion Viana vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg.

Der Zentralbereich unserer Milchstraße beherbergt viele Objekte, die kosmische Strahlung großer Energie erzeugen können, unter anderem einen Supernovaüberrest, einen Pulsarwindnebel

und einen kompakten Sternhaufen. „Dennoch ist das supermassive Schwarze Loch im galaktischen Zentrum, das Sagittarius A* genannt wird, die plausibelste Quelle der PeV-Protonen“, sagt Felix Aharonian vom Heidelberger Max-Planck-Institut und dem Dublin Institute for Advanced Studies.

„Unsere Daten zeigen, dass der beobachtete Schein aus Gammastrahlen symmetrisch um das galaktische Zentrum liegt“, erläutert H.E.S.S.-Forscher Stefan Klepser von DESY. „Die Gammastrahlen haben so hohe Energie und sind derart zum Zentrum hin konzentriert, dass es naheliegt, dass sie das Echo eines gewaltigen Teilchenbeschleunigers sein müssen, der sich im Zentrum dieses Scheins befindet. Vermutlich im galaktischen Zentrum selbst.“

„Unsere Daten zeigen, dass der beobachtete Schein aus Gammastrahlen symmetrisch um das galaktische Zentrum liegt“

Stefan Klepser, DESY

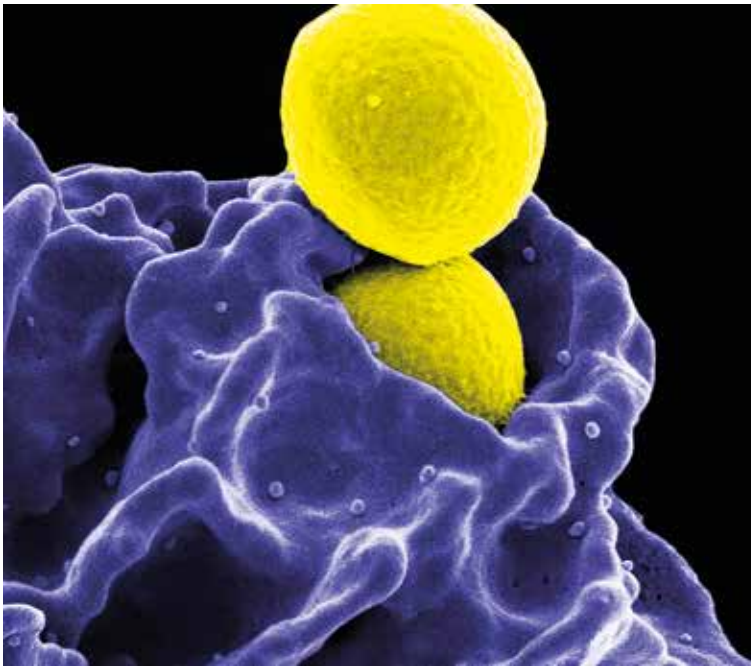
Mehrere Beschleunigungsregionen sind vorstellbar, entweder in der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Lochs oder etwas weiter außerhalb. Dort könnte ein Teil des Materials, das in Richtung des Schwarzen Lochs fällt, wieder herausgeschleudert und möglicherweise in der Umgebung weiter beschleunigt werden.

Die Beobachtung der Gammastrahlung aus dem galaktischen Zentrum weist deutlich darauf hin, dass Sagittarius A* Protonen auf eine Energie von bis zu einem PeV beschleunigt. Die Messungen zeigen aber auch, dass diese Quelle allein den auf der Erde gemessenen Fluss der kosmischen Strahlung nicht aufrechterhalten kann. „Wenn Sagittarius A* aber in der Vergangenheit aktiver war, dann könnte diese Quelle tatsächlich die gesamte galaktische kosmische Strahlung erzeugt haben“, sagt H.E.S.S.-Vizedirektor Christopher van Eldik von der Universität Erlangen. Ist diese Vermutung der Forscher korrekt, so wären sie einer umfassenden Antwort auf die 100 Jahre alte Frage nach dem Ursprung der kosmischen Strahlung wieder ein gutes Stück näher.

.....
Nature, 2016; DOI: 10.1038/nature17147

Maßgeschneiderte Wirkstoffe überlisten Krankenhauskeime

Vielversprechender Ansatz im Kampf gegen resistente Bakterien



Elektronenmikroskop-Aufnahme von antibiotika-resistenten Krankenhauskeimen der Art *Staphylococcus aureus* (gelb koloriert), die von einem weißen Blutkörperchen (blau koloriert) gefressen und damit unschädlich gemacht werden.

Bild: National Institute of Allergy and Infectious Diseases (NIAID)

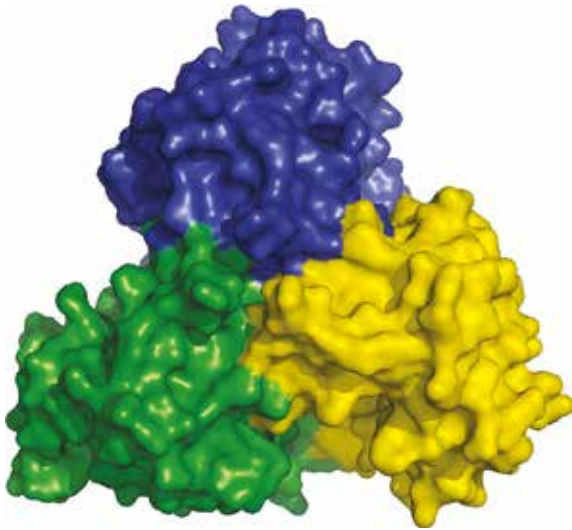
Antibiotikaresistenzen sind ein wachsendes Gesundheitsproblem. Immer mehr Bakterienstämme werden unempfindlich für bestimmte Antibiotika – sie lernen, sich auf die Attacken einzustellen, und entwickeln eine Immunität dagegen. Die wichtigste Waffe gegen bakterielle Infektionen droht damit stumpf zu werden. Sogenannte Methicillin-resistente Staphylokokken (MRSA) sind oft bereits gegen alle gängigen Antibiotika-Arten resistent und lassen sich nur noch mit Notfall- und Reservewirkstoffen bekämpfen. MRSA tritt nicht nur in Krankenhäusern auf, wo sich durch die Häufung von Keimen und Antibiotika leichter

Resistenzen entwickeln können, auch der Einsatz von Antibiotika in der Massentierhaltung fördert weltweit resistente Keime.

Hamburger Forscher haben gemeinsam mit Kollegen aus Brasilien und China an DESYs Röntgenlichtquellen einen vielversprechenden Ansatz entwickelt, um antibiotika-resistente Krankenhauskeime zu überlisten. Statt die MRSA-Bakterien direkt zu attackieren, greifen die Wissenschaftler in einen für den Krankheitserreger lebenswichtigen Stoffwechselzyklus ein.

„Klassische Wirkstoffe blockieren eine bestimmte Funktion des Bakteriums“, erläutert Christian Betzel von der Universität Hamburg, der im

Laboratorium für Strukturbioogie von Infektion und Entzündung auf dem DESY-Campus forscht. „Dann kann das Bakterium einen Weg um die Blockade herum entwickeln und wird dadurch resistent gegen diesen Wirkstoff.“ Die Forscher um Betzel und Carsten Wrenger von der Universität Sao Paulo greifen dagegen geschickt in den Vitamin-B1-Zyklus der Staphylokokken ein, ohne diesen zu blockieren. Das Bakterium ist darauf angewiesen, das lebenswichtige Vitamin B1 selber herzustellen. An den Messstationen des Europäischen Molekularbiologie-Labors EMBL bei DESY haben die Wissenschaftler die Struktur der beteiligten Enzyme atomgenau bestimmt. Die >> im



Das Enzym ThiM bildet ein sogenanntes Trimer aus je drei ThiM-Molekülen. Die aktiven Flächen liegen auf den drei Grenzflächen der einzelnen Moleküle.

Wissenschaftler „füttern“ dieses Enzym dann mit einer maßgeschneiderten, scheinbar nützlichen Zutat für die Vitamin-B1-Produktion. Dieses sogenannte Substrat ist jedoch gegenüber der natürlichen Variante ganz leicht verändert, so dass eine nutzlose Form des Vitamins entsteht.

Der Trick mit dem Vitamin

„Damit überlisten wir den Organismus“, erläutert Betzel. „Wir geben ihm etwas, von dem er glaubt, dass er es benötigt – aber in leicht veränderter Form, so dass er letztlich nichts damit anfangen kann. Im Idealfall bemerkt das Bakterium den Grund gar nicht, weil der Vitamin-B1-Zyklus ja weiter funktioniert.“ Das Vitamin eignet sich dabei nach Ansicht der Forscher aus zwei Gründen besonders als Ansatzpunkt. „Der Vitamin-B1-Zyklus ist sehr essenziell. Dazu gibt es kaum alternative Wege“, sagt Markus Perbandt von der Universität Hamburg. Und zudem: „Menschen haben kein ähnliches Enzym. Das ist sehr wichtig, um Kreuzreaktionen zu vermeiden.“

Doch wie muss das ideale Substrat genau aussehen, damit das Bakterium es auch annimmt? Dazu haben sich die Forscher mit Hilfe der DESY-Röntgenlichtquellen die atomare Struktur der beteiligten Enzyme angeschaut. „Am Vitamin-B1-Zyklus sind sechs Enzyme beteiligt. Vier davon sind bereits analysiert“,

berichtet Betzel. „Am interessantesten davon ist das Enzym namens ThiM. Bei dem Substrat, mit dem wir dieses Enzym ‚füttern‘, müssen wir nur zwei Atome verändern, um es nutzlos zu machen.“ ThiM ist ein sogenanntes Trimer. Das bedeutet, dass sich jeweils drei ThiM-Moleküle zu einem Komplex zusammenschließen. „Dieses Trimer hat damit drei aktive Zentren, die jeweils in den Grenzflächen der drei Moleküle liegen“, erläutert Betzel.

„Wir legen dem Bakterium quasi ein Stück Schokolade neben ein Stück trocken Brot“

Christian Betzel, Universität Hamburg

„Wenn man die Struktur der aktiven Zentren genau kennt, kann man gezielt ein nutzloses Substrat entwickeln“, sagt Perbandt. Doch das Enzym soll nicht nur das falsche Substrat benutzen, es soll es dem echten sogar vorziehen, das ihm ja ebenfalls zur Verfügung steht. Dafür machen die Forscher ihre Fälschung chemisch attraktiver, indem sie gezielt bestimmte Molekülgruppen anhängen. „Wir legen dem Bakterium quasi ein Stück Schokolade neben ein Stück trocken Brot“, sagt

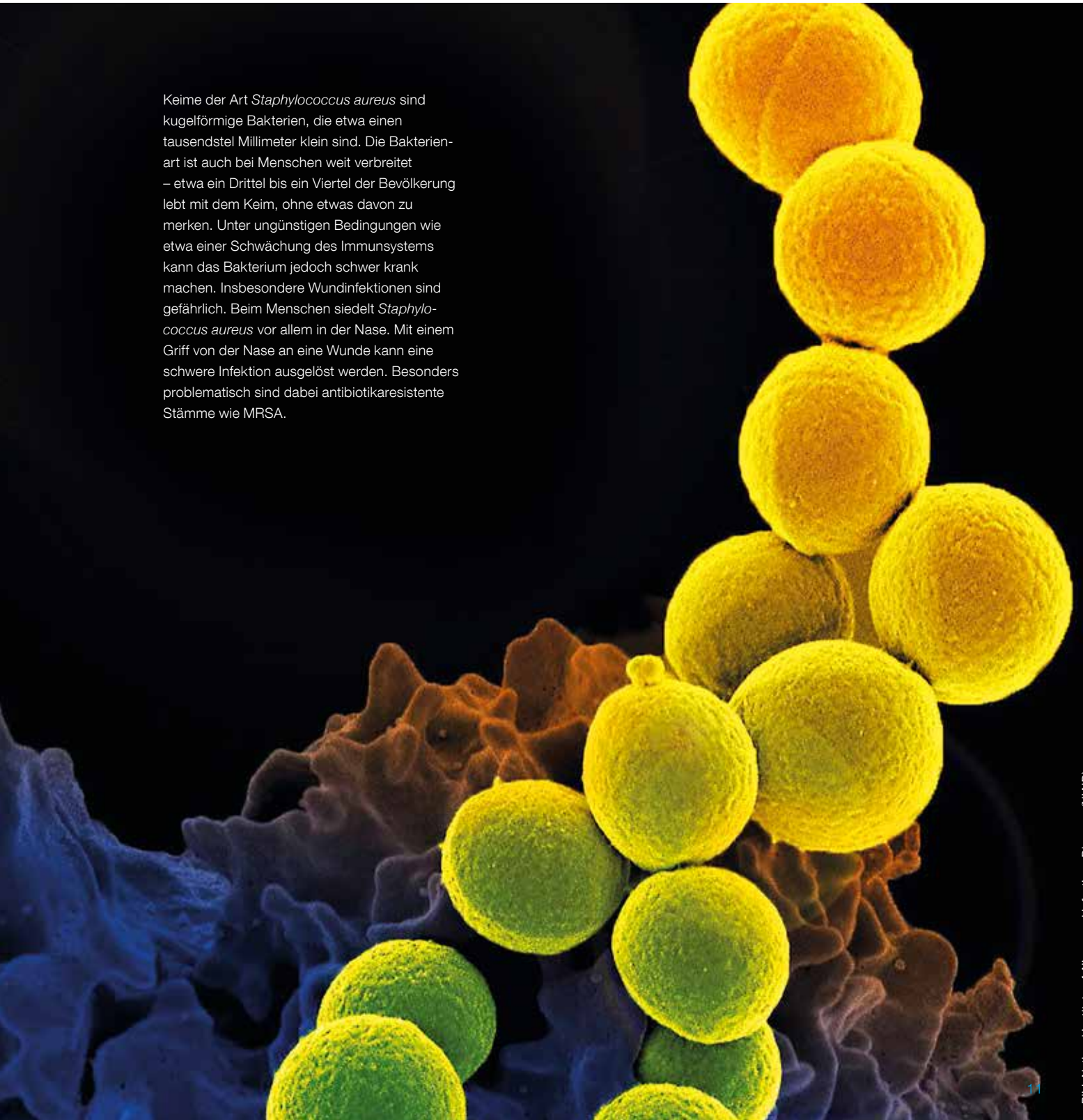
Betzel. „Das geht nur, wenn man die atomare Struktur des angesprochenen Enzyms genau kennt.“ „Von ursprünglich zwölf Wirkstoff-Kandidaten haben sich drei als vielversprechend erwiesen“, berichtet Perbandt. „Mit denen finden nun Tests in Zellkulturen statt.“ Ob dabei schließlich ein neues Medikament entsteht, lässt sich noch nicht sagen. Doch der Ansatz, mit Hilfe der Kenntnis der atomgenauen Struktur eines Biomoleküls einen Wirkstoff maßzuschneidern, eignet sich nicht nur für Mittel gegen MRSA. „Diese neue Art der strukturbasierten Wirkstoffentwicklung ist zukünftig auch zur Bekämpfung anderer Erreger vielversprechend“, sagt Perbandt. Und die Methode hat weitere Vorteile: „Die strukturbasierte Wirkstoffentwicklung spart nicht nur Geld, sondern auch eine ganze Menge Tierversuche.“

.....
Scientific Reports, 2016; DOI: 10.1038/srep22871

„Diese neue Art der strukturbasierten Wirkstoffentwicklung ist zukünftig auch zur Bekämpfung anderer Erreger vielversprechend“

Markus Perbandt, Universität Hamburg

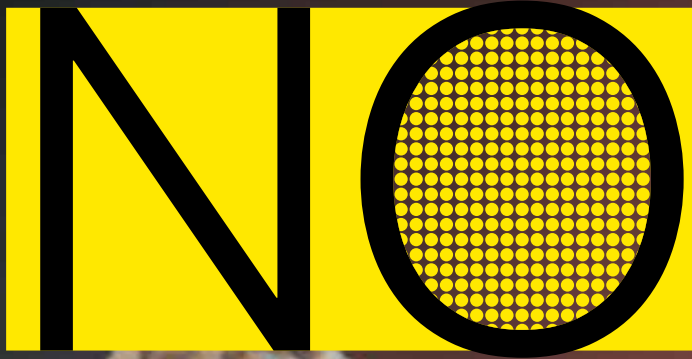
Keime der Art *Staphylococcus aureus* sind kugelförmige Bakterien, die etwa einen tausendstel Millimeter klein sind. Die Bakterienart ist auch bei Menschen weit verbreitet – etwa ein Drittel bis ein Viertel der Bevölkerung lebt mit dem Keim, ohne etwas davon zu merken. Unter ungünstigen Bedingungen wie etwa einer Schwächung des Immunsystems kann das Bakterium jedoch schwer krank machen. Insbesondere Wundinfektionen sind gefährlich. Beim Menschen siedelt *Staphylococcus aureus* vor allem in der Nase. Mit einem Griff von der Nase an eine Wunde kann eine schwere Infektion ausgelöst werden. Besonders problematisch sind dabei antibiotikaresistente Stämme wie MRSA.



ZOOM

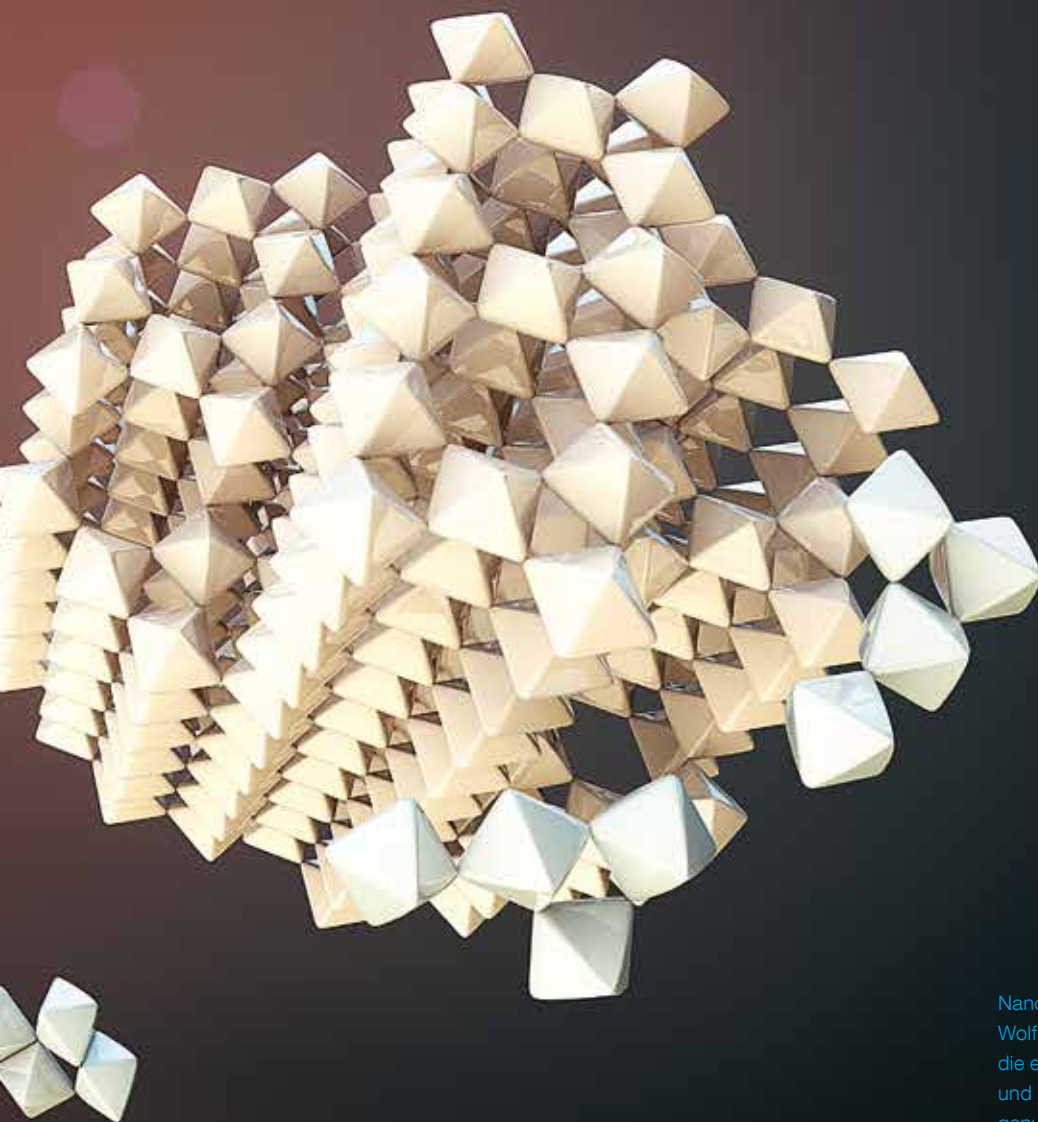


Sind millionstel
Millimeter
der Maßstab
der Zukunft?



Nano ist ein Schlagwort, das fast jeder kennt. Und Nano ist klein – sehr klein sogar: Ein Nanometer entspricht einem Millionstel eines Millimeters. Materie im Nano-Maßstab hat andere physikalische und chemische Eigenschaften als ihr Pendant mit Zentimeter- oder Meterabmessungen. Weil sie so klein sind, haben Nanopartikel eine

große Oberfläche im Verhältnis zu ihrem Volumen. Das macht sie chemisch reaktiv und interessant für Forschung und Industrie. An DESYs Röntgenlichtquellen lassen sich Nanowerkstoffe atomgenau durchleuchten und ihre Eigenschaften für verschiedene Anwendungen maßschneidern.



Nanopartikel aus
Wolfram-Trioxid,
die etwa für Solarzellen
und intelligente Fenster
genutzt werden können.

NANO ganz groß

Warum die „Zwerge“ bei DESY Furore machen



Andreas Stierle leitet das DESY-NanoLab und ist Professor für Nanowissenschaften an der Universität Hamburg.

Was haben ein Schlagbohrer, ein Kochtopf und ein Gartenzwerg gemeinsam? Praktisch nichts, außer dass sie etwa 20 bis 40 Zentimeter groß sind.

Niemand käme auf die Idee, künstliche Objekte dieser Größe als „Zentimetertechnologie“ zusammenzufassen, argumentiert der Physiker Christian Meier in seinem Buch „Nano“. Bei der „Nanotechnologie“ sei jedoch genau dies geschehen. „Nano“, abgeleitet vom griechischen Wort „nanos“ für Zwerg, ist zunächst nur ein Vorsatz für eine Maßeinheit, die den milliardsten Teil von etwas bezeichnet. Im Falle der Nanotechnologie geht es um Abmessungen im Bereich von milliardstel Metern, und es gibt einen Grund, warum der „Zwerg“ unter den Längenmaßen Furore macht, die Zentimetertechnologie hingegen niemandem ein Begriff ist: Strukturen und Systeme, die kleiner sind als 100 Nanometer, zeigen neue funktionale Eigenschaften, die in entsprechenden makroskopischen Systemen nicht auftreten.

Das hat Wissenschaft und Wirtschaft gleichermaßen auf den Plan gerufen und einen ganzen Forschungs- und Industriezweig geschaffen, der sich mit neuen Phänomenen, Gesetzmäßigkeiten und Anwendungen von Strukturen auf der Skala unterhalb von 100 Nanometern befasst. Durch Nanostrukturen können bessere oder neue Funktionalitäten erzielt werden, zum Beispiel bei Katalysatoren, Datenspeichern oder Sensoren. Auch die individuellen Eigenschaften einzelner Nanopartikel stehen im Fokus der Nanowissenschaft. Und die sind ebenso vielfältig wie die Einsatzgebiete der winzigen Teilchen.

Dass die „Zwerge“ überhaupt ins Blickfeld der Forscher gerieten, ist einer Reihe von wissenschaftlichen Durchbrüchen zu verdanken. „Rasterelektronenmikroskope und andere Techniken ermöglichen uns den Zugang zu kleinsten Skalen“, erläutert Andreas Stierle, Leiter des DESY-NanoLabs. „Besonders vielseitig sind die Möglichkeiten modernster Röntgenlichtquellen, die auf Elektronenbeschleunigern basieren und

„Besonders vielseitig sind die Möglichkeiten modernster Röntgenlichtquellen, die sogar dynamische Prozesse in der Nanowelt mit atomarer Auflösung abbilden.“

Andreas Stierle, DESY

sogar dynamische Prozesse in der Nanowelt mit atomarer Auflösung abbilden.“ Diese Forschungslichtquellen kombinieren Stierle und sein Team im DESY-NanoLab mit einem Spektrum von Analysegeräten und Methoden, um Werkstoffe, Nanopartikel, Oberflächen und Prozesse auf der Nanoskala zu untersuchen, ihre atomare Struktur und chemische Zusammensetzung zu bestimmen und damit das Anwendungspotenzial der Nanomaterialien umfassend auszuloten. >>



Bild: DESY, Heiner Müller-Elsner

Im DESY-NanoLab können Wissenschaftler unter anderem eine Ultrahochvakuum-Anlage nutzen, in der Nanoproben mit verschiedenen Methoden analysiert werden können.

femtopolis

Klein, kleiner, am kleinsten

Mikros“ ist das griechische Wort für klein, und es stand Pate für „Mikro“, die Vorsilbe, die den millionsten Teil einer Maßeinheit beschreibt. Ein Millionstel von einem Meter etwa ist schon ganz schön klein und eine millionstel Sekunde verdammt kurz. Doch die heutige Wissenschaft hat das „Mikro“ längst hinter sich gelassen – klein ist nicht mehr klein genug.

Stattdessen jonglieren die Forscher mit den Milliardstel-Abmessungen der Nanowelt und schrecken auch vor „Femto“, also milliardstel, nicht zurück. Während „Nano“ vor allem auf der Längenskala Furore macht, weil sich im Nanometerbereich vielversprechende neue Eigenschaften von Werkstoffen auf tun, steht „Femto“ vor allem als Zeiteinheit im Fokus der Forscher.

Eine Million Nanometer beträgt der Durchmesser eines Stecknadelkopfes. Ein menschliches Haar kommt auf etwa 80 000 Nanometer, Viren auf 50 bis 100 Nanometer. Die Nanotechnologie spielt sich im Größenbereich von etwa 1 bis 100 Nanometern ab. Und die Atome und Moleküle, um deren Zusammenspiel es in der Nanowissenschaft geht, reagieren auf der Skala von Femtosekunden miteinander. Eine Femtosekunde ist der milliardste Teil einer Sekunde – unvorstellbar kurz, wenn man bedenkt, dass unser menschliches Reaktionsvermögen etwa eine Zehntel-

sekunde beträgt. In dieser einen Zehntelsekunde sind 100 Millionen Femtosekunden vergangen. Auf der Skala von Femtosekunden laufen chemische Reaktionen ab und bewegen sich Biomoleküle. Das macht Femtosekunden so interessant für die Forscher.

Wer bis zu den Atomen vordringen will, der landet auf der Skala von Ångström. Diese nach dem schwedischen Physiker Anders Jonas Ångström benannte Längeneinheit entspricht einem zehntel Nanometer und ist die typische Größenordnung für Atomradien, Abstände von Atomen in Kristallstrukturen und Bindungslängen in Molekülen.

Die passende Zeitskala für den Blick ins Atom hinein sind Attosekunden, das sind trillionstel Sekunden oder anders ausgedrückt: der milliardste Teil einer milliardstel Sekunde. In Attosekunden bewegen sich die Elektronen in der Hülle von Atomen. Mit Ultrakurzzeit-Lasern sind Forscher selbst auf dieser Zeitskala unterwegs.

➤ Katalysator-Verschleiß live im Blick

Ein Beispiel sind Katalysatoren, also Stoffe, die eine chemische Reaktion beschleunigen oder überhaupt erst ermöglichen, selbst dabei jedoch unverändert bleiben. Sie sind in zahlreichen industriellen Prozessen unverzichtbar, von der Umwelttechnik über die Herstellung von Kraftstoffen bis zur Produktion von Dünger für die Landwirtschaft. Das wohl bekannteste Beispiel ist der Abgaskatalysator im Auto: Darin wandelt eine Mischung aus Platin, Rhodium und Palladium giftiges Kohlenmonoxid und schädliche Stickoxide in weniger gefährliche Verbindungen um. Stierle und sein Team konnten erstmals live auf der Nanoebene beobachten, wie Platin-Nanopartikel unter den Betriebsbedingungen eines Auto-Katalysators zusammenwachsen und dadurch an Effizienz verlieren.

Die Effizienz einer bestimmten Menge Katalysatormaterials steigt mit dessen zur Verfügung stehender Oberfläche an. „Eine Kugel mit einem Zentimeter Durchmesser hat eine Oberfläche von gut drei Quadratzentimetern“, erklärt Uta Hejral vom DESY-NanoLab. „Aus derselben Materialmenge ließen sich im Prinzip auch 1,3 Billionen Kügelchen mit je zehn Nanometern Durchmesser formen, die hätten zusammen eine Oberfläche von 386 Quadratmetern – das entspricht etwa zwei Tennisplätzen.“

Im Betrieb kann sich jedoch die Größe der Partikel ändern, was die Leistung des Katalysators mindert. Daher haben die Hamburger Wissenschaftler Platin- und Rhodium-Nanopartikel unter kontrollierten Bedingungen beobachtet, die den realen Betriebsbedingungen im Auto-Katalysator ähneln. Dazu ließen sie zunächst Nanopartikel aus unterschiedlichen Mischungen der beiden untersuchten Metalle auf einem Trägermaterial wachsen und verwendeten diese Proben, um in einer Reaktionskammer bei 280 Grad Celsius Kohlenmonoxid (CO) mit Sauerstoff (O₂) in Kohlendioxid (CO₂) umzuwandeln.

Unter diesen Reaktionsbedingungen, die jenen im Auto-Katalysator ähneln, veränderten die Nanopartikel je nach Mischungsverhältnis der beiden Metalle unterschiedlich stark ihre Form. „Reine Platin-Nanopartikel wuchsen deutlich in die Höhe. Ihre Größe verdoppelte sich von zwei auf etwa vier Nanometer“, berichtet Hejral. „Das war wirklich überraschend.“ Reine Rhodium-Partikel blieben dagegen sehr stabil und veränderten ihre Höhe kaum. Die Mischpartikel mit gleichen Anteilen Platin und Rhodium verhielt sich fast ebenso stabil.

„Die Untersuchung zeigt, dass die Platin-Nanopartikel freiwerdende Energie aus der

chemischen Reaktion aufnehmen, um sich zusammenzulagern“, erläutert Hejral. „Enthielten die Platin-Partikel zu Beginn jeweils etwa 15 000 Atome, waren es am Ende des Versuchs etwa jeweils 23 000. Durch diese Zusammenlagerung schrumpfte die Bedeckung des Trägermaterials durch die Platin-Nanopartikel von anfänglich 50 Prozent auf etwa 35 Prozent.“ Die Forscher gehen davon aus, dass die Platin-Partikel danach streben, eine für sie energetisch günstigere, runde Form anzunehmen. Die Herstellung der Partikel in einer Form, die derjenigen dieser Selbstorganisation nahekommt, könnte Umlagerungen und damit einen Rückgang der Effizienz vermindern.

Auto-Katalysatoren sind basierend auf Erfahrungswerten weitgehend optimiert, jedoch gibt es noch viele offene Fragen hinsichtlich der auf atomarer Ebene ablaufenden Prozesse unter Reaktionsbedingungen. Wenn man diese versteht, lassen sich die Lebensdauer und die Effizienz der Katalysatoren weiter verbessern. Die neue Methode gewährt hierzu Einblicke und lässt sich dabei nicht nur auf Auto-Katalysatoren anwenden, betont Stierle: „Mit unserem Verfahren können wir die optimalen Mischungsverhältnisse und Partikelgrößen experimentell bestimmen. Das lässt sich für Katalysatoren mit verschiedensten Anwendungen nutzen und kann der chemischen Industrie neue Möglichkeiten eröffnen.“

„Reine Platin-Nanopartikel wuchsen deutlich in die Höhe. Ihre Größe verdoppelte sich von zwei auf etwa vier Nanometer“

Uta Hejral, DESY-NanoLab

High-Speed-Röntgentechnik

An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III haben Forscher außerdem eine High-Speed-Röntgentechnik entwickelt, die es ermöglicht, Katalysatoren live bei der Arbeit zuzusehen. Mit ihr lässt sich die atomare Struktur von Oberflächen so schnell bestimmen, dass Live-Aufnahmen von Oberflächenreaktionen wie Katalyse oder Korrosion mit einer Zeitauflösung von weniger als einer Sekunde möglich werden. „Wir können damit Oberflächenprozesse verfolgen, die sich bislang nicht in Echtzeit beobachten ließen, und die in vielen Bereichen der Materialforschung eine zentrale Rolle spielen“, erläutert Stierle.



Die Wissenschaftlerin Uta Hejral hat im DESY-NanoLab Katalysator-Nanopartikel analysiert.

Möglich macht das die hochenergetische Röntgenstrahlung von PETRA III, die in einem sehr kleinen Winkelbereich streut. Damit können die Forscher ein vergleichsweise kompaktes Beugungsmuster aufnehmen und mit einem leistungsstarken Flächendetektor komplett in einer Aufnahme bestimmen. „Dieser Ansatz beschleunigt die Datenaufnahme um das Zehn- bis Hundertfache“, betont Stierle. Auf diese Weise können die Forscher eine komplette Oberflächenstruktur in weniger als zehn Minuten aufnehmen oder individuelle Strukturmerkmale mit einer zeitlichen Auflösung von weniger als einer Sekunde beobachten. „Wir bekommen neue Einblicke in die Kinetik von Oberflächenprozessen und können mit diesem Wissen neue Materialien auf atomarer Ebene konstruieren“, berichtet Stierle.

„Wir können damit Oberflächenprozesse verfolgen, die in der Materialforschung eine zentrale Rolle spielen“

Andreas Stierle, DESY

Auf dem Weg zum „Molekülkino“

Ganze Filme von den atomaren Vorgängen auf einer Katalysatoroberfläche lassen sich mit der neuesten Generation der Röntgenlichtquellen drehen: den Freie-Elektronen-Lasern. So hat ein internationales Team um Hamburger Forscher mit dem Röntgenlaser LCLS am US-Beschleunigerzentrum SLAC eine Katalysatoroberfläche auf Molekülebene in Aktion beobachtet. Erst-

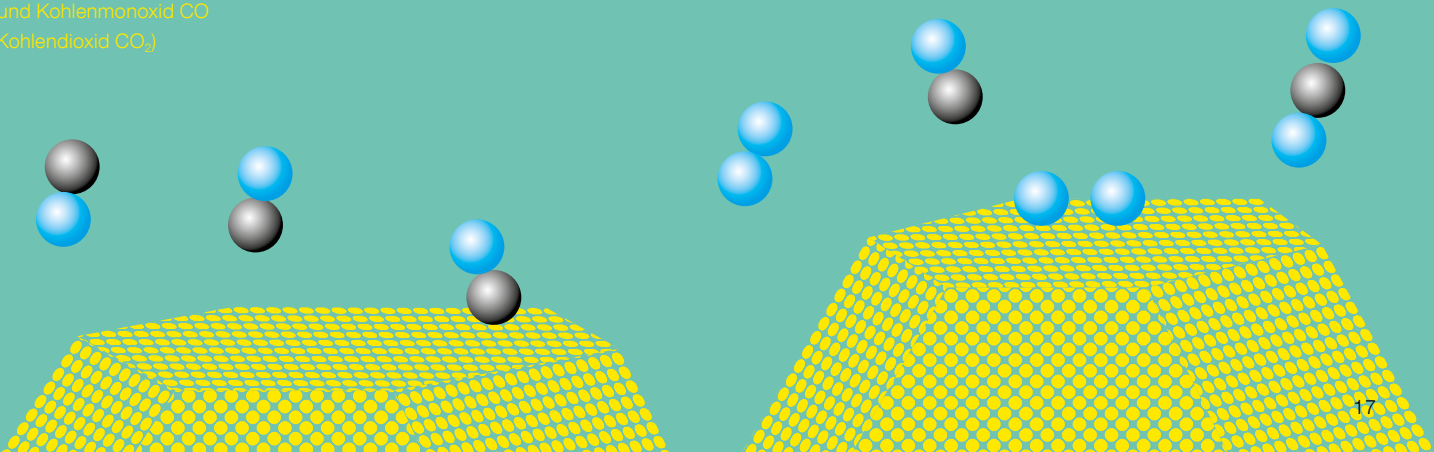
mals wiesen die Wissenschaftler direkt einen Übergangszustand nach, in dem die Moleküle kurzzeitig über dem Katalysator schweben, bevor sie endgültig davonfliegen. Obwohl bis zur Verfolgung einer vollständigen katalytischen Reaktion auf einem großtechnisch verwendeten Katalysator mit einem Röntgenlaser noch experimentelle Entwicklungsarbeit nötig ist, ist diese Beobachtung ein wichtiger erster Schritt zur Erkundung der ultraschnellen Dynamik von Oberflächenreaktionen.

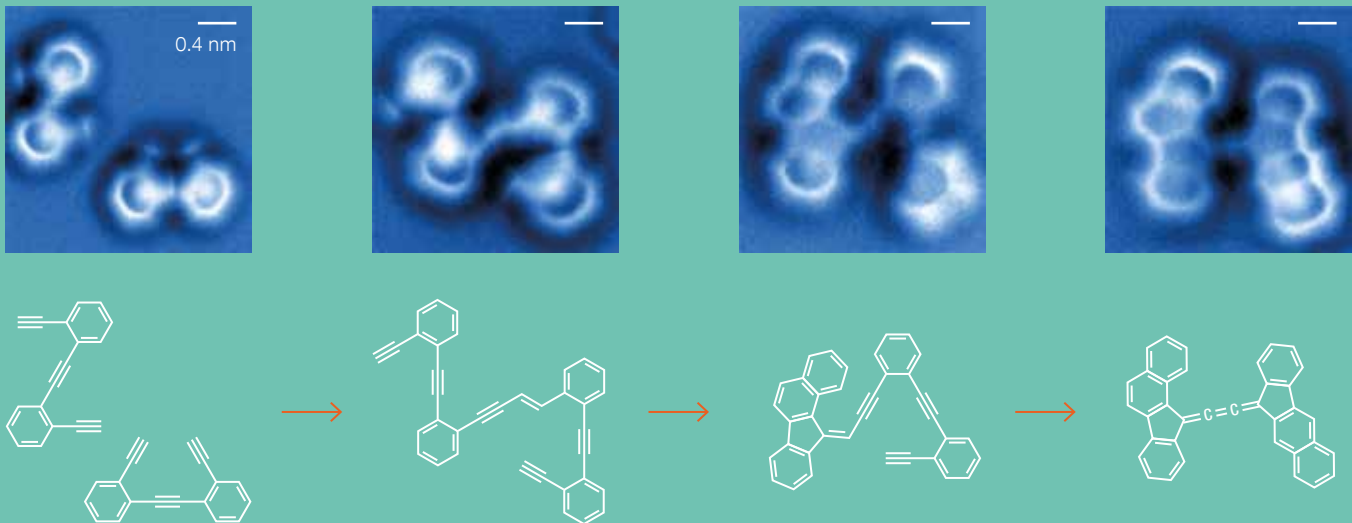
„Wir haben mit dieser Untersuchung gezeigt, dass die Beobachtung dieser Prozesse mit Röntgenlasern möglich ist“, betont Wilfried Wurth, der als Leitender Wissenschaftler für DESYs Freie-Elektronen-Laser FLASH zuständig ist. „Das eröffnet auch die Möglichkeit, wesentlich komplexere Reaktionen zu untersuchen.“

An FLASH hat ein deutsch-amerikanisches Forscherteam auch erstmals die dreidimensionale Form frei fliegender Silber-Nanopartikel bestimmt. Die winzigen Teilchen besitzen demnach einen viel größeren Formenreichtum als erwartet. Die Funktionalität von Nanopartikeln ist mit ihrer geometrischen Form verknüpft. Diese lässt sich aus der charakteristischen Art und Weise berechnen, wie das Röntgenlicht gestreut wird. Röntgenquellen wie FLASH und der Röntgenlaser European XFEL, der zurzeit in der Region Hamburg gebaut wird, fungieren so als eine Art Supermikroskop für die Nanowelt.

Die Möglichkeit, die dreidimensionale Form von Nanopartikeln mit nur einem einzigen Schuss eines Röntgenlasers bestimmen zu können, eröffnet eine Vielzahl neuer Forschungsrichtungen. Teilchen könnten in zukünftigen Projekten beim Wachstum direkt dreidimensional „gefilmt“ werden. >>

Platin-Nanopartikel zu Beginn des Experiments (links, unter Kohlenmonoxid-Fluss, CO) und nach dem Zusammenwachsen (rechts, während der Reaktion von Sauerstoff O₂ und Kohlenmonoxid CO zu Kohlendioxid CO₂)





Es ist ein langersehntes Ziel der Chemie, die Veränderungen der Struktur von Molekülen während einer chemischen Reaktion direkt beobachten zu können. Denn die Struktur sogenannter reaktiver Zwischenprodukte, die im Verlauf einer chemischen Reaktion kurzzeitig entstehen und sofort wieder neue Produkte bilden, liefert detaillierte Einblicke in die Reaktionsmechanismen, was sowohl für die chemische Industrie als auch für Gebiete wie Materialwissenschaften, Nanotechnologie, Biologie und Medizin von großer Bedeutung ist: Was reagiert genau wann mit wem? Aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer ist es jedoch besonders schwierig, reaktive Nebenprodukte zu identifizieren und zu charakterisieren.

Einem internationalen Forscherteam unter der Leitung von Felix Fischer, Michael Crommie (University of California, Berkeley, und Lawrence Berkeley National Laboratory) und Angel Rubio (Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie am Center for Free-Electron Laser Science CFEL in Hamburg und Universität des Baskenlandes in San Sebastián) ist es gelungen, den Ablauf einer komplexen, technologisch relevanten katalytischen Reaktion im Detail zu beobachten. Die mit einem Rasterkraftmikroskop gewonnenen Aufnahmen zeigen, wie sich zwei organische Moleküle aus der Klasse der Endiine an einem Katalysator aus Silber verbinden, ringförmige Strukturen bilden und schließlich ein neues Molekül formen.

➤ Nanopartikel steigern Leistung von Solarzellen

Sogenannte organische Solarzellen auf Kunststoffbasis besitzen großes Potenzial: Sie sind kostengünstig, flexibel und vielseitig einsetzbar. Ihr Nachteil gegenüber den etablierten Silizium-Solarzellen ist ihre geringere Stromausbeute. Typischerweise setzen sie nur wenige Prozent des einfallenden Sonnenlichts in Elektrizität um. Dennoch sind organische Solarzellen bereits an vielen Stellen wirtschaftlich, und Forscher suchen nach neuen Wegen, um die Energieausbeute zu erhöhen.

Ein vielversprechender Weg ist die Beimischung von Nanopartikeln. So ließ sich zeigen, dass Gold-Nanopartikel zusätzliches Sonnenlicht absorbieren, das in der Solarzelle zusätzliche elektrische Ladungsträger erzeugt, wenn es von den Goldpartikeln wieder abgegeben wird. Auch magnetische Nanopartikel können die Leistung von Kunststoff-Solarzellen steigern – sofern die Mischung stimmt. Das zeigt eine weitere Röntgenuntersuchung an PETRA III. Eine Beimischung der Nanopartikel von etwa einem Gewichtsprozent macht die Solarzellen effizienter, wie Forscher um Peter Müller-Buschbaum von der Technischen Universität München beobachtet haben.

„Das Licht erzeugt in der Solarzelle jeweils ein Paar von Ladungsträgern, das aus einem negativ geladenen Elektron und einer Fehlstelle, einem sogenannten Loch, mit positiver Ladung besteht“, erläutert Daniel Moseguí González aus der Gruppe von Müller-Buschbaum. „Die Kunst einer organischen Solarzelle ist, diese Elektron-Loch-Paare zu trennen, bevor sie sich wieder vereinen können. Denn dann wäre die zuvor erzeugte Ladung wieder verloren. Wir haben einen Weg gesucht, die Lebensdauer der Elektron-Loch-Paare zu verlängern, so dass mehr von ihnen getrennt und zu unterschiedlichen Elektroden geführt werden können.“

Nanopartikel aus Magnetit (Fe_3O_4) können genau dies leisten. „Die Beimischung von Magnetit-Nanopartikeln erhöhte den Wirkungsgrad der Solarzellen in unserem Versuch um bis zu elf Prozent“, berichtet Moseguí González. Die Lebensdauer der Elektron-Loch-Paare wird signifikant erhöht.

Die Beimischung von Nanopartikeln ist dabei eine Routinetechnik, die sich in den verschiedenen Produktionsverfahren von organischen Solarzellen problemlos anwenden lässt. Wichtig ist jedoch, dass nicht zu viele Nanopartikel in die Solarzelle gemischt werden. Denn organische

Solarzellen besitzen eine sorgfältig abgestimmte innere Struktur, bei der die lichtsammelnden aktiven Materialien mit optimalen Längenskalen gemischt sind, um die Ladungsträger-Paare möglichst effizient zu trennen. Diese Strukturen liegen im Bereich von 10 bis 100 Nanometern.

„Die Beimischung von Magnetit-Nanopartikeln erhöhte den Wirkungsgrad der Solarzellen um bis zu elf Prozent“.

Daniel Moseguí González, Technische Universität München

„Werden sehr viele Nanopartikel in das Material der Solarzelle gemischt, verändert sich die Struktur des Materials, wie die Röntgenuntersuchung gezeigt hat“, erläutert DESY-Physiker Stephan Roth, Leiter der Messstation, an der die Versuche stattfanden. „Die untersuchte Solarzelle kann eine Dotierung mit Magnetit-Nanopartikeln von bis zu einem Gewichtsprozent verkraften, ohne dass sich die Struktur ändert.“

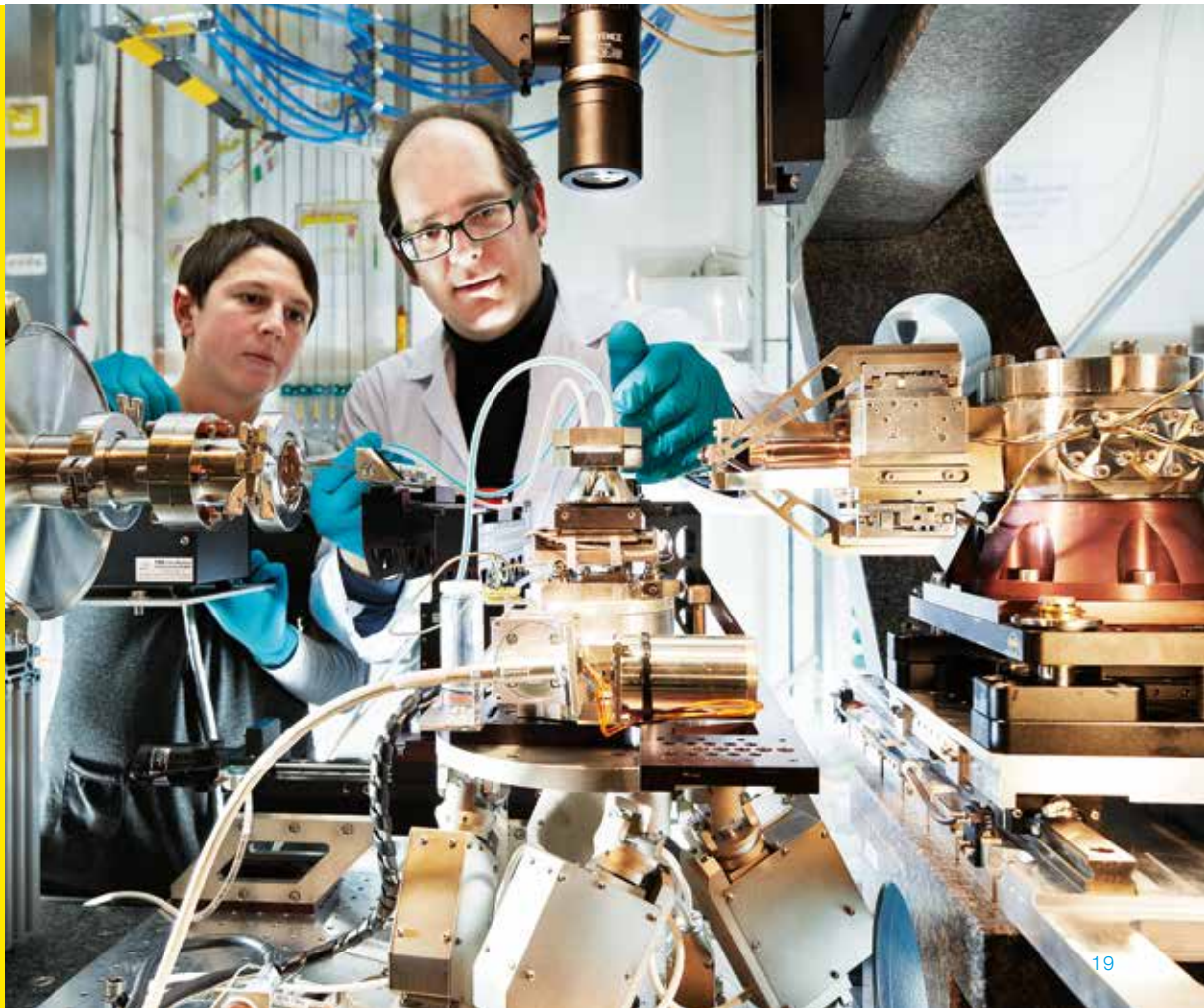
Den größten Effekt beobachteten die Wissenschaftler bei einer Dotierung mit 0,6 Gewichtsprozent Nanopartikeln. Die Effizienz der untersuchten Kunststoff-Solarzelle stieg dabei von 3,05 Prozent auf 3,37 Prozent. „Elf Prozent zusätzliche Energieausbeute können durchaus über die Wirtschaftlichkeit einer Anwendung entscheiden“, betont Forschungsleiter Müller-Buschbaum.

Die Forscher erwarten, dass sich auch die Leistung anderer Kunststoff-Solarzellen durch die Dotierung mit Nanopartikeln weiter steigern lässt. „Die Kombination von leistungsfähigen Polymeren mit Nanopartikeln lässt also für die Zukunft noch weitere Steigerungen der Effizienzen von organischen Solarzellen erwarten. Ohne eine detaillierte Untersuchung, wie zum Beispiel mit Röntgenstrahlung eines Synchrotrons, ist ein grundlegendes Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse aber nicht zu erlangen“, summiert Müller-Buschbaum.

Innovative Tandem-Solarzellen

Die Kombination verschiedener hauchdünner Schichten ist der Clou an den vielversprechenden Tandem-Solarzellen. Um die Effizienz zu steigern, wird dabei eine zweite Polymer-Solarzelle auf die erste geschichtet, die für einen anderen Bereich >>

DESY-Forscher Stephan Roth analysiert verschiedene Nanomaterialien an der Röntgenlichtquelle PETRA III.



› des Sonnenspektrums empfindlich ist. Diese Tandem-Solarzelle wandelt entsprechend einen größeren Anteil des Sonnenlichts in elektrischen Strom um und erhöht so die Energieausbeute.

Die Multibeschichtung birgt besondere Herausforderungen, wie Forschungsleiter Jens W. Andreasen von der Dänischen Technischen Universität (DTU) in Roskilde erläutert: „Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass fertige Schichten durch das Lösungsmittel der folgenden Schicht wieder angelöst werden können, was zum kompletten Ausfall der Solarzelle führt.“ Um das Lösen der ersten Solarzelle zu verhindern, haben die Wissenschaftler eine sorgfältig komponierte Schutzschicht zwischen den beiden Solarzellen ihrer Tandem-Beschichtung eingeführt. Diese Schutzschicht enthält unter anderem eine nur 40 Nanometer dünne Schicht Zinkoxid.

„Mit Hilfe der 3D-Ptychographie konnten wir die komplette Tandem-Solarzelle abbilden“

Gerald Falkenberg, DESY

Um die Form und Unversehrtheit der Schutzschicht und der übrigen Schichten der Tandem-Solarzelle zu überprüfen, nutzten die Forscher eine spezielle Röntgentechnik an PETRA III. „Mit Hilfe der 3D-Ptychographie konnten wir die komplette Tandem-Solarzelle abbilden und unter anderem die Unversehrtheit der 40 Nanometer dünnen Zinkoxidschicht in der Schutzschicht zeigen, die erfolgreich die tieferen Lagen vor einer Beschädigung durch Lösungsmittel bewahrt

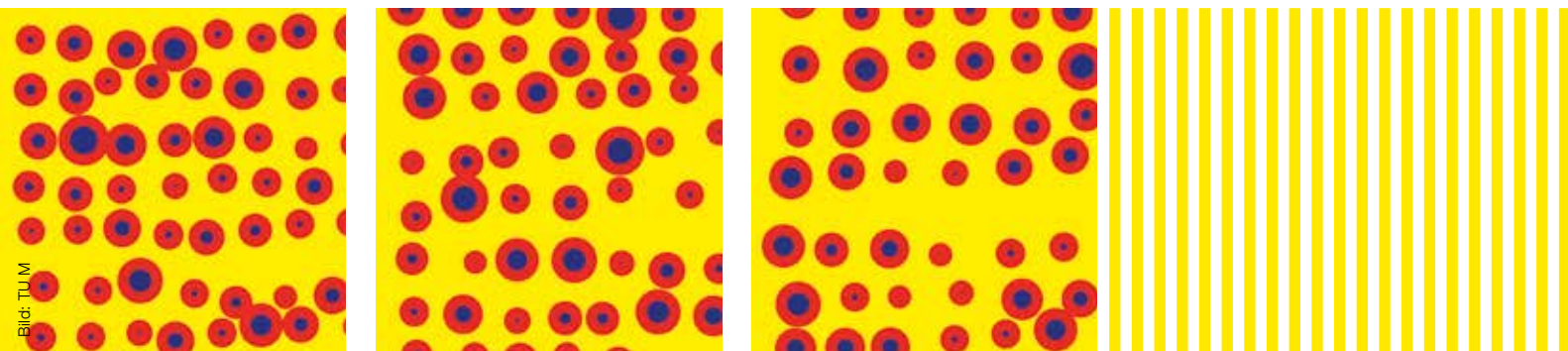
hat“, erläutert DESY-Forscher Gerald Falkenberg, an dessen Messstation die Versuche stattfanden. Dieses Ergebnis ebnet den Weg zu einer möglichen industriellen Anwendung der Technik.

Nanowerkstoffe mit neuen Eigenschaften

Klassische Materialien aus Keramiken, Metallen oder Kunststoffen haben ihre typischen mechanischen Eigenschaften. Sie sind hart, weich, fest, verformbar oder auch starr. Wissenschaftler der Technischen Universität Hamburg (TUHH), der Universität Hamburg, des Helmholtz-Zentrums Geesthacht und von DESY haben ein Nanomaterial entwickelt, das mehrere Eigenschaften vereinen und damit neue Anwendungen in der Medizintechnik und Produktherstellung eröffnen kann. Das neuartige Material ist gleichzeitig fest, hart und sehr steif. Sein Aufbau ähnelt auf kleinster Ebene natürlichem Hartgewebe wie Perlmutter oder Zahnschmelz. Seine Bausteine sind einheitlich große Eisenoxid-Nanopartikel, die mit einer Hülle aus organischer Ölsäure umgeben sind.

Den Wissenschaftlern ist es unter anderem mit einer kontrollierten Wärmebehandlung gelungen, die Ölsäuremoleküle sehr stark zu verbinden und damit das mechanische Verhalten des Nanokomposit-Materials entscheidend zu verbessern. Die neue Materialklasse lässt sich etwa für Zahnfüllungen oder auch die Herstellung von Uhrengehäusen einsetzen. Hierfür muss das Material hart und zugleich bruchfest sein.

Die Bindungseigenschaften der als Kleber fungierenden Ölsäure haben Mitarbeiter des DESY-NanoLabs mit spektroskopischen Methoden untersucht. „Die Messungen ergaben, dass die Ölsäuremoleküle die Wärmebehandlung überstehen und sich während dieses Prozesses weiter vernetzen“, berichtet NanoLab-Leiter Stierle.



Schematische Darstellung der aktiven Schicht einer organischen Solarzelle: Die orangenen Punkte repräsentieren die aktiven Domänen, an denen Licht in Ladungsträger umgewandelt wird. Forscher der Technischen Universität München haben mit Hilfe von DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III live dem Verschleiß dieser Solarzellen zugesehen. Im Betrieb verändern sich die Domänen: Durchmesser und Abstand vergrößern sich.

„Diese wichtige Information ist die Grundlage für die erfolgreiche Modellierung der mechanischen Eigenschaften dieses neuartigen Materials.“ Da auch andere Nanoteilchen sehr häufig in Kombination mit organischer Ölsäure verarbeitet werden, hat die verwendete Methode das Potenzial, auch bei einer Vielzahl anderer Nanomaterialien die mechanischen Eigenschaften zu verbessern.

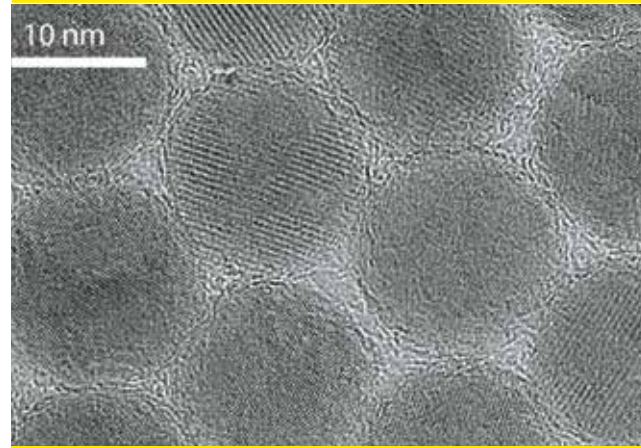
Selbstorganisation in der Nanowelt

DESY-Forscher haben außerdem ein neues Verfahren entwickelt, mit dem sich metallische Nanostrukturen selbst bauen und ordnen. Dieser sogenannte Bottom-up-Ansatz bietet eine schnelle und einfache Alternative zu bisherigen Verfahren und ist damit auch für die Wirtschaft interessant, die immer häufiger Nanostrukturen nutzt. Für viele wissenschaftliche Fragestellungen und technische Anwendungen ist es wichtig, dass die Nanostrukturen sich in einem geordneten Muster wiederholen. Größen und Abstände der einzelnen Musterelemente liegen dabei zwischen einigen wenigen und mehreren hundert Nanometern. Oft ist es eine große Herausforderung, Nanostrukturen sowohl auf großer Fläche als auch mit regelmäßiger Anordnung herzustellen. Hierbei kann das neue Verfahren seine Stärke ausspielen.

„Die Methode erlaubt, ausgesprochen gleichförmige Nanostrukturen in sehr regelmäßigen Anordnungen herzustellen“

Denise Erb, DESY

„Vor allem erlaubt die Methode, ausgesprochen gleichförmige Nanostrukturen in sehr regelmäßigen Anordnungen mit verhältnismäßig geringem Aufwand herzustellen“, erläutert Denise Erb aus der DESY-Forschungsgruppe um Ralf Röhlsberger. Mit einem Spezialaufbau konnten die Forscher an der Röntgenlichtquelle PETRA III den Nanostrukturen beim Wachsen zusehen. „Bei Bottom-up-Methoden, auch selbstorganisierende Methoden genannt, zwingen wir das Material nicht in ein bestimmtes Muster wie bei Top-down-Verfahren“, beschreibt Erb. „Stattdessen schaffen wir Bedingungen, die es dem Material erlauben, sich selbst zu ordnen und Nanostrukturen auszubilden.“ Der große Vorteil liegt darin, dass die Bildung der Nanostrukturen



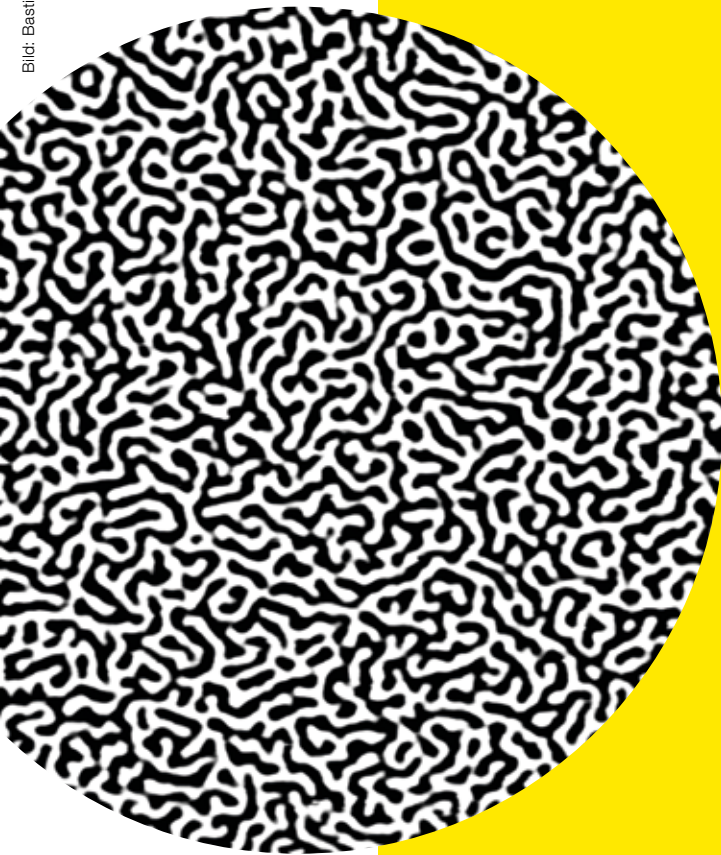
Eisenoxid-Nanoteilchen umgeben von Ölsäuremolekülen unter einem hochauflösenden Elektronenmikroskop

auf der gesamten Fläche gleichzeitig geschieht, so dass die Dauer der Herstellung nicht mehr von der Größe der Fläche abhängt.

Um die gewünschten Nanostrukturen per Bottom-up-Verfahren zu erhalten, können auch mehrere verschiedene selbstorganisierende Materialien miteinander kombiniert werden. Der Aufbau der Nanostrukturen geschieht dann schrittweise, so dass die Ordnung der ersten Struktur die Bildung der zweiten Struktur beeinflusst. Durch eine solche Kombination entstehen besonders gleichmäßige Strukturen und Muster. Erb und ihre Kollegen kombinieren auf diese Weise Kristalle, Polymere und Metalle. „Für Wissenschaftler dürfte besonders spannend sein, dass man mit Röntgenstreuung live dabei zusehen kann, wie sich die Nanostrukturen bilden und wie sich dabei ihre physikalischen Eigenschaften entwickeln“, sagt Röhlsberger.

Die Miniaturisierung der Datenspeicher

Nanostrukturen bieten auch neue Möglichkeiten, immer kleinere und schnellere magnetische Datenspeicher zu entwickeln. Um die Prozesse, die der Magnetisierung zugrunde liegen, im Detail zu verstehen, nutzen Forscher unter anderem den Freie-Elektronen-Laser FLASH. „Mit seinen ultrakurzen Röntgenblitzen ist FLASH in der Lage, sowohl zeitlich als auch räumlich kleinste Veränderungen in der Größe und den Eigenschaften von magnetischen Domänen festzustellen“, erklärt Gerhard Grübel, Leitender Wissenschaftler bei DESY, dessen Arbeitsgruppe unter anderem magnetische Materialien mit Röntgenlaserlicht analysiert. >>



Die Magnetkraftmikroskop-Aufnahme zeigt die labyrinthartige Struktur der magnetischen Domänen.

➤ Eisen und andere Ferromagnete sind häufig in nanometerkleine magnetische Domänen aufgeteilt. Zwischen diesen Bereichen mit unterschiedlicher Magnetisierung können sich Elektronen blitzschnell hin- und herbewegen und so die Entmagnetisierung des Materials beeinflussen, wie ein internationales Forscherteam um Gröbel und Stefan Eisebitt von der Technischen Universität Berlin an FLASH herausgefunden hat. Dieser Effekt könnte bei der Verkleinerung von magnetischen Speichern eine entscheidende Rolle spielen.

Mit einem kurzen Laserlichtpuls lösten die Forscher zunächst die Entmagnetisierung der Probe aus und analysierten diese anschließend mit Röntgenlaserlicht. „Optische Demagnetisierung ist das mit Abstand schnellste Verfahren, um lokal die Magnetisierung zu ändern, und diese wiederum ist die Grundlage von magnetischer Datenspeicherung“, erklärt Eisebitt. „Optische Verfahren könnten deshalb helfen, magnetische Speicher zukünftig schneller zu machen.“

Supermikroskope für die Nanowissenschaft

Das kurzwellige Röntgenlicht eignet sich ideal, um Atome und Moleküle sichtbar zu machen, entsprechend groß ist die Nachfrage bei den Nanoforschern. „DESYS Röntgenquellen FLASH und PETRA III sind die idealen Supermikroskope,

um Strukturen und Prozesse in der Nanowelt zu beobachten und zu verstehen“, betont DESY-Forschungsdirektor Edgar Weckert. „Auf unserem Hamburger Campus erforschen wir fachübergreifend und gemeinsam mit verschiedenen Institutionen und Partnern Materialien und Werkstoffe auf der Nanoskala.“ Auf dem Gebiet der Materialforschung arbeitet DESY eng mit dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht zusammen. Ebenso mit der Universität Hamburg, die mehrere Institute im Umfeld von DESY angesiedelt hat und mit dem Center for Hybrid Nanostructures ein Institut aufbaut, das sich auf die Verbindung von nanoelektronischen und biologischen Materialien spezialisiert. „Die Nanowissenschaften bieten ein enormes Potenzial“, resümiert Weckert.

„DESYS Röntgenquellen FLASH und PETRA III sind die idealen Supermikroskope, um Strukturen und Prozesse in der Nanowelt zu beobachten und zu verstehen“

Edgar Weckert, DESY

„Materialien mit ganz neuen Eigenschaften werden entwickelt, ebenso innovative Anwendungen für Bereiche wie Gesundheit, Mobilität und die Energieversorgung von morgen.“



Edgar Weckert ist Direktor für den Bereich Forschung mit Photonen bei DESY.

Die MISCHUNG

mach't's

Die Kombination verschiedener Materialien auf der Nanoebene birgt für viele Forscher besonderes Potenzial. Die Universität Hamburg baut für die Erforschung solcher Kombinationsmaterialien derzeit auf dem DESY-Campus in Hamburg das Center for Hybrid Nanostructures (CHyN), das 2016 fertiggestellt wird und 2017 in Betrieb genommen werden soll. Gründungsdirektor ist der Leiter des Instituts für Nanostruktur- und Festkörperphysik (INF) an der Universität Hamburg, Robert Blick.

femto: Herr Blick, was versteht man unter hybriden Nanostrukturen?

Blick: Dabei geht es im Wesentlichen um die Mischung verschiedener Materialien auf der Nanometerebene. Das können etwa Halbleiter und magnetische Metalle sein oder auch Halbleiter mit biologischem Material. Dabei können völlig neue Funktionen entstehen – zum einen durch den Mix der Materialien, zum anderen entwickeln viele Materialien auf der Nanoskala grundlegend neue Eigenschaften.

femto: Wofür kann man das benutzen?

Blick: Ein tolles Beispiel ist eine aktuelle Kooperation von uns mit der Universität Lund in Schweden. Dabei nehmen wir Nanodrähte und kombinieren diese mit lebenden Nervenzellen. In diese Drähte, bis zu 50 Nanometer dünn und einige Mikrometer lang, haben die Kollegen aus Lund so etwas wie eine Solarzelle eingebaut – wenn Licht darauf scheint, entsteht eine elektrische Spannung. Damit kann man die Funktion einer Zelle auslösen. Wir experimentieren beispielsweise damit, auf diesem Weg das Aktionspotenzial von Nervenzellen von Mäusen zu triggern. Das kann man als einen ersten Schritt etwa zu einem Netzhautimplantat sehen.

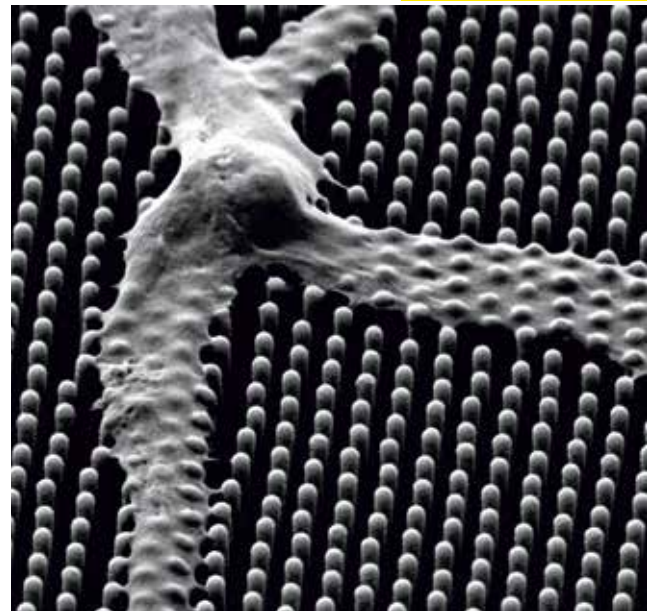
femto: Das klingt futuristisch.

Blick: Ja, das ist eher noch fernere Zukunft. Es gibt aber auch Dinge, die bereits angewandt werden. Mit einer Firma aus Kalifornien entwickeln wir ein Schnelldurchsatzgerät für die Erbgutanalyse. Die DNA-Basenpaare wandern durch Nanoporen und werden optisch ausgelesen. Bisher muss man die Geschwindigkeit der Basenpaare drosseln, weil die Analyseverfahren einfach nicht schnell genug sind. Für unseren neuen Ansatz legen wir einen elektrischen Radiofrequenzaufbau um die Nanopore und können dadurch den Prozess rund zehnmals schneller ablaufen lassen.

femto: Worin liegt das große Potenzial dieser Materialien?

Blick: Es geht hier um einen neuartigen Ansatz. Wir konstruieren Materialien an der Schnittstelle zwischen klassischer Festkörperphysik und Quantenmechanik. Wenn man auf dieser Skala Physik, Biologie und Chemie zusammenbringt, dann entsteht etwas völlig Neues. Das kann in alle Richtungen gehen. Wir können Eigenschaften und Funktionen erzeugen und nutzen, die auf anderer Ebene nicht zugänglich sind. Darin liegt für mich eindeutig die Zukunft.

<http://www.chyn.de/>



Nervenzelle einer Maus, die auf einer Matrix aus Nanodrähten wächst

Der BOOM der NANO FORSCHUNG

Die Möglichkeiten der Nanoteilchen sind riesig – und noch längst sind nicht all ihre Potenziale erforscht und umgesetzt. Weltweit arbeiten Wissenschaft und Industrie daran, Nanomaterialien nutzbar zu machen. Das Spektrum reicht von Batterien, Displays, Textilien und Verpackungsmaterialien bis hin zur Medizin.

Auch wenn konventionelle Mikroskope sie nicht sichtbar machen können – ein Blick auf die Etiketten verrät sie doch: Nanoteilchen, die in zahlreichen Produkten stecken und längst den Sprung aus den Forschungslaboren in unseren Alltag geschafft haben. In Sonnencremes schützen uns winzige Partikel aus Titandioxid vor ultravioletter Strahlung, Silberteilchen helfen gegen Schweißgeruch in T-Shirts oder sorgen für keimfreie Wundpflaster. Elektronische Schaltelemente in Computerchips basieren auf Nanotechnologie, ebenso selbstreinigende Oberflächen für Autos oder Dachziegel. Experten zufolge ist das nur der Anfang – in den winzigen Teilchen steckt noch mehr Potenzial. Sie könnten künftig dazu beitragen, Krebs und andere Krankheiten zu bekämpfen, die Energieversorgung zu sichern und Umweltverschmutzungen zu beseitigen.

Auch wenn es noch nicht ganz soweit ist – Nanotechnologie ist mehr als ein schicker Name für einen jungen Forschungszweig und eine Vielzahl von Alltagsanwendungen. Denn entscheidend ist nicht nur die Größe, sondern vielmehr die spannende Möglichkeit, Strukturen zu manipulieren, die kleiner als 100 millionstel Millimeter oder 100 Nanometer sind. Seit kurzem erst sind Forscher in der Lage, diese Effekte zu verstehen und vor allem zu nutzen.

Verheißungsvolle Fußballer

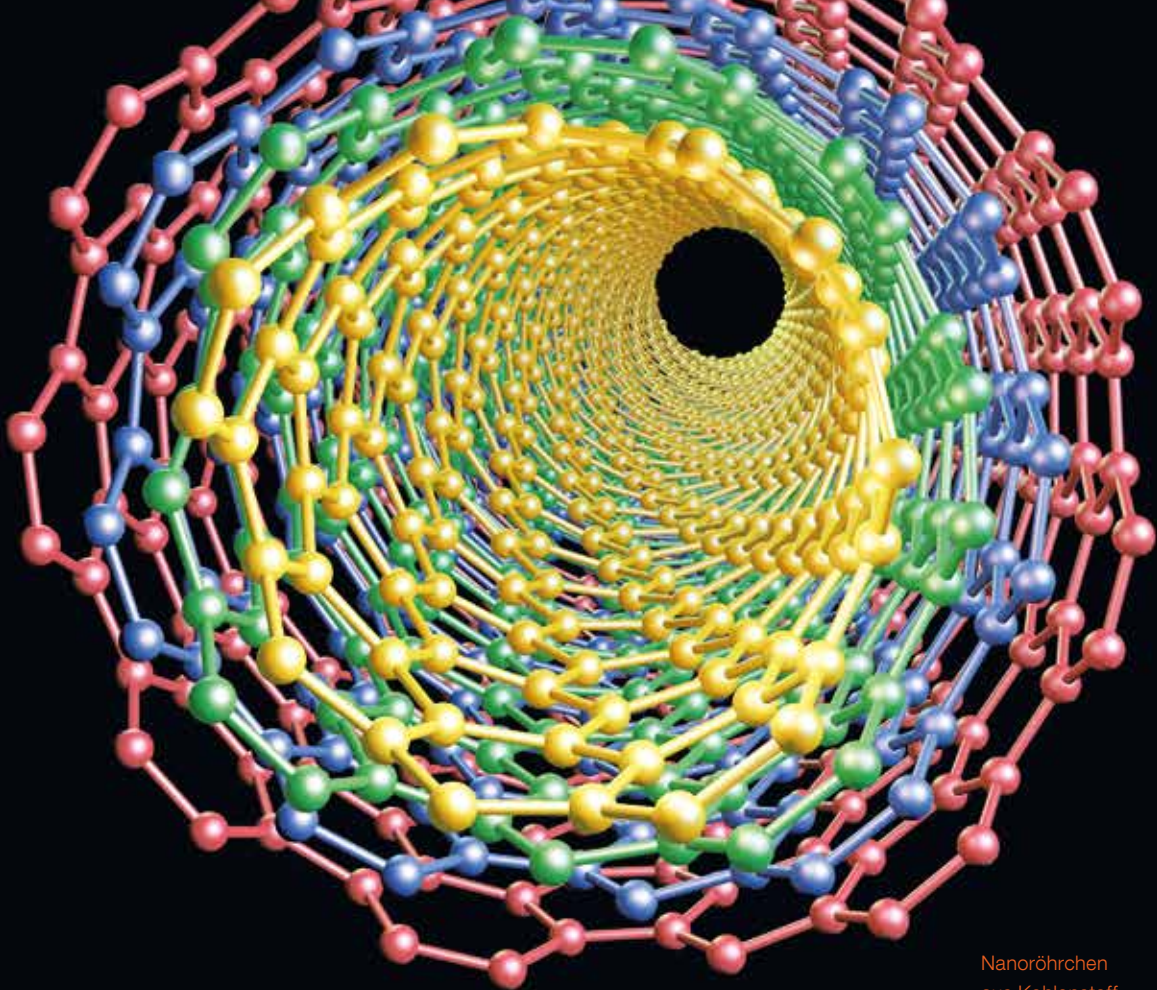
1981 stellten Forscher das Rastertunnelmikroskop vor – das erste Werkzeug, mit dem sie die Strukturen der Nanowelt halbwegs dreidimensional darstellen konnten. In den Jahren danach entdeckten Wissenschaftler einige Nanoteilchen

mit Eigenschaften, die für Aufsehen sorgten. Einen ersten Hype gab es um die Fullerene – Kohlenstoffmoleküle, die wie millionenfach verkleinerte Fußbälle aussehen. Forscher waren ihnen zwar schon länger auf der Spur, aber erst die Chemiker Harold Kroto, Robert Curl und Richard Smalley beschrieben die Fullerene 1985 im Fachmagazin *Nature*. Sie bestehen aus 60 Kohlenstoffatomen, und wie beim echten Fußball ist ihre Oberfläche aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken aufgebaut. Fachleute waren damals überzeugt, die Fullerene würden eine ganz neue Chemie begründen. 1996 erhielten die Wissenschaftler für ihre Entdeckung den Chemie-Nobelpreis.

„Damals hat man den Fullerenen eine große Zukunft vorausgesagt“, sagt Karl-Heinz Haas, Leiter der Geschäftsstelle der Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie, die sich intensiv mit der Erforschung und Anwendung von Nanomaterialien beschäftigt. „Bisher sind die Einsatzmöglichkeiten überschaubar.“ So finden sich Fullerene aufgrund ihrer hohen Elektronenaffinität beispielsweise als Radikalfänger in Anti-Aging-Cremes. Das ist allerdings noch nicht die neue Chemie, von der Experten anfangs träumten. „Fullerene könnten zukünftig in der Medizin und der Photovoltaik von Nutzen sein“, sagt Haas.

Anfang der 1990er Jahre entdeckte der japanische Wissenschaftler Sumio Iijima ein weiteres vielversprechendes Nanomaterial: winzige Röhrenmoleküle aus Kohlenstoff, Nanotubes genannt, deren Festigkeit die von Stahl weit übertrifft. Sie sind enorm widerstandsfähig und leiten Strom und Wärme besser als alle anderen bekannten Werkstoffe. Ihre Entdeckung gab der Fantasie der Materialentwickler Anlauf, die von hochauflösenden Displays mit extrem niedrigem Energieverbrauch träumten, bis hin zu ultrafesten Fasern, mit deren Hilfe Ingenieure Aufzüge zu den Satelliten im Orbit bauen könnten. Die Nanoröhren finden sich mittlerweile in Batterien, Displays und Sportgeräten. Einziges Problem: Ihre Herstellung ist sehr teuer. „Momentan arbeitet man vor allem daran, die Produktionsverfahren günstiger zu machen“, sagt Haas.

Noch ein weiteres Kohlenstoff-Nanomaterial brachte es 2010 zum Nobelpreis: das Graphen, die jüngste Entdeckung in der Familie der neuen Kohlenstoffvarianten. Die beiden Physiker Andre Geim und Konstantin Novoselov konnten das zweidimensionale Gitter aus Kohlenstoffatomen erstmals 2004 nachweisen. Durch mühevollen Fleißarbeit: Sie zogen von einem Stück Graphit mit Hilfe eines simplen Tesafilms Schicht für Schicht ab, bis die verbleibende Schicht nur noch ein Atom hoch war – und erhielten so Graphen.



Nanoröhrchen
aus Kohlenstoff

Besonders die sehr gute elektrische Leitfähigkeit des Graphens begeistert Forscher und macht es für zahlreiche Anwendungen interessant. „Da es fast durchsichtig ist, ist es für flexible Anwendungen, beispielsweise transparente Touchscreens, spannend“, sagt Haas. Wissenschaftler hoffen, bald Graphen-Transistoren bauen zu können, die sehr viel schneller wären als herkömmliche aus Silizium. Einen ersten stellte der IT-Konzern IBM bereits vor.

„Jetzt müssen wir in den Mühen der Ebene arbeiten und zeigen, dass man die Erkenntnisse in Produkte bringt, die wirklich einen Vorteil haben“

Karl-Heinz Haas, Fraunhofer-Allianz

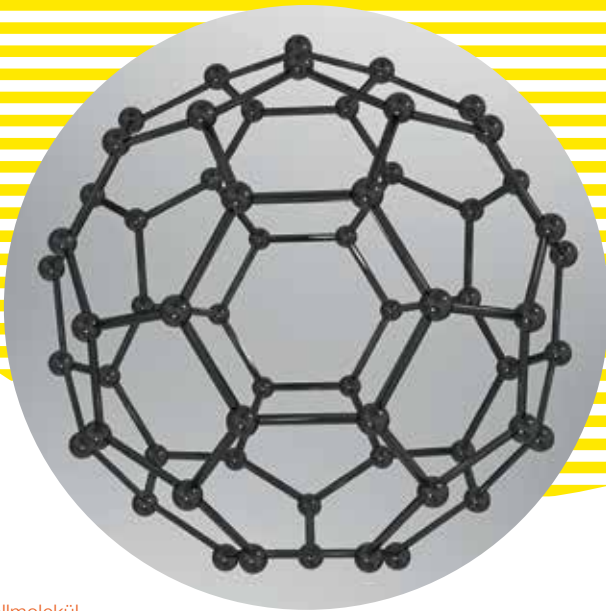
Industrielle Nanowerkstoffe

Abseits der winzigen Kohlenstoff-Werkstoffe gibt es auch etliche Nanomaterialien, die die Industrie gezielt herstellt. Beispielsweise für die Verwen-

dung in vielen technischen Bereichen, aber auch in verbrauchernahen Produkten wie Lacken, Kosmetika, Textilien oder Verpackungsmaterialien. Dazu gehören Nanosilber, Titandioxid oder Nanoton.

„Vieles ist nicht mehr nur Vision – es gibt eine Unmenge von Anwendungen“, resümiert Haas. Die Experten spüren, was die Technik noch kann – das erfordert nun aber vor allem Zeit und Geduld. „Jetzt müssen wir in den Mühen der Ebene arbeiten und zeigen, dass man die Erkenntnisse und Entdeckungen in Produkte bringt, die wirklich einen Vorteil haben.“ Daran arbeiten weltweit Forscher und Industrie. Allein in Deutschland beschäftigen sich laut Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über 2000 Akteure mit Nanotechnologie, darunter rund 200 Forschungsinstitute und 600 Hochschulforschungsorganisationen.

So breit die Einsatzgebiete der kleinen Technik sind, so vielgestaltig ist auch die Forschungslandschaft. Die meisten Institutionen forschen zu Nanomaterialien, gefolgt von Nanobeschichtungen, Nanoanalytik und Nanobiotechnologie, heißt es im aktuellen Nano-Report des BMBF. Am erfolgreichsten sind Anwendungen im Bereich der Nanomaterialien. >>



Fußballmolekül
(Fulleren) aus 60
Kohlenstoffatomen

➤ Einsatz in der Medizin

Aus dem Nano-Report geht hervor, dass Experten zukünftig viel Hoffnung vor allem auf Entwicklungen in der Medizin setzen. Die im Report befragten Forschungsinstitute schätzen, dass in den kommenden Jahren besonders die Bereiche Medizin, Pharma und Energie von den Errungenschaften der Nanotechnologie profitieren werden. Sie haben damit die Elektronik an der Spitze abgelöst. Dort sei die Nanotechnologie längst etablierter Standard, sagt Fraunhofer-Forscher Haas. „Moderne Mikroelektronik ist seit fünf bis zehn Jahren Nanoelektronik. Alle Strukturen sind unterhalb von 100 Nanometern.“

Aber auch in der Medizin gab es in den vergangenen Jahren bereits etliche Fortschritte. Wissenschaftler entwickelten zahlreiche nanoskalige Systeme, die pharmazeutische Substanzen im Körper transportieren und gezielt an bestimmte Stellen bringen können. „Besonders im Bereich dieser Drug-Delivery-Systeme kommen in der Medizin immer mehr Entwicklungen in die Anwendung“, sagt Wolfgang Luther aus der Abteilung Innovationsbegleitung und -beratung beim Technologiezentrum des Vereins Deutscher Ingenieure VDI in Düsseldorf. Auf der Basis von Polysacchariden oder Polymeren können Nanopartikel als Träger dienen und bringen so die Wirkstoffe nicht nur an einen bestimmten Ort, sondern sorgen auch dafür, dass sie zu einer bestimmten Zeit freigesetzt werden.

„Viel Hoffnung setzt man auch auf den Einsatz der Nanotechnologie in der individualisierten Medizin“, sagt Luther. Durch Weiterentwicklungen von Hochdurchsatzanalyseverfahren können Mediziner zukünftig individuelle Merk-

male genetischer Baupläne und Stoffwechselreaktionen eines einzelnen Patienten immer präziser und schneller erfassen. Und damit die Grundlage für maßgeschneiderte Präventions- und Therapiestrategien bilden.

Mit Hilfe von 3D-Druckern sollen aus Nanomaterial individuelle Ersatzteile für den Körper gedruckt werden. „Das sind natürlich keine ganzen Gliedmaßen“, sagt Fraunhofer-Forscher Haas. „Aber Ohrknöchelchen oder kleine Teile im Dentalbereich – das geht schon.“ Ein Anfang.

Auch im Umwelt- und Energiebereich macht die Technik immer weitere Fortschritte. „Schon heute kann man Luftschadstoffe mit Nanomaterialien abbauen, weil sie eine sehr große Oberfläche haben“, sagt Luther, „da lässt sich noch einiges verbessern.“ Die Forschung zur Grundwasseranreicherung arbeitet mit Nanomaterial aus winzigen Eisenteilchen und Aktivkohle, das den Abbau von schädlichen Chlorkohlenwasserstoff-Verbindungen in verunreinigtem Grundwasser beschleunigen soll.

„Ein Schwerpunkt der Nanotechnologie in Deutschland liegt auf der Energietechnik“

Wolfgang Luther, VDI-Technologiezentrum Düsseldorf

In Solarzellen und Energiespeichern könnten Nanomaterialien dazu beitragen, erneuerbare Energien voranzutreiben und den Energieverbrauch zu senken. „Einer der Schwerpunkte der Nanotechnologie in Deutschland liegt auf der Energietechnik“, sagt Luther. Viel Forschungsgeld wird derzeit in die Batterieforschung gesteckt. „Leistungsfähige Batterien sind Schlüsselkomponenten, um die Elektromobilität auf die Straße zu bringen – da will Deutschland gegenüber der Konkurrenz aus Asien aufholen.“ Außerdem braucht es für die Elektromotoren Magnete. Die Rohstoffe dafür sind Seltenerd-Metalle, die nur begrenzt verfügbar sind. Künftig wollen Wissenschaftler und Ingenieure Magnete entwickeln, die sich mit seltenerdfreien Materialien, beispielsweise aus Hartferriten bauen lassen. Auch in Generatoren von Windkraftanlagen könnten diese Materialien eingesetzt werden.

Zu Risiken und Nebenwirkungen

Mit der unglaublichen Vielfalt der Anwendungen und kleinsten Teilchen geht jedoch auch eine Vielfalt an Risiken einher. „Das Problem ist, dass

wir über die Wirkung vieler Nanomaterialien und -partikel noch zu wenig wissen, um dazu eine fundierte Aussage zu treffen“, sagt Peter Laux, Leiter der Fachgruppe Produktbeschaffenheit und Nanotechnologie am Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) in Berlin. Dafür brauche es geeignete analytische Verfahren, um diese kleinsten Teilchen aufzuspüren. „Diese Verfahren sind noch in der Entwicklung.“

„Das Problem ist, dass wir über die Wirkung vieler Nanomaterialien noch zu wenig wissen“

Peter Laux, BfR Berlin

Heute untersuchen Wissenschaftler beispielsweise, wie Nanopartikel sich im Lebenszyklus von Produkten verhalten und in welcher Menge sie in Gewässer und Böden gelangen. Über das Waschen gelangen beispielsweise Silber-Nanopartikel aus Textilien ins Abwasser. Da Kläranlagen die winzigen Teilchen aber nicht vollständig herausfiltern können, können sie in Gewässern und Böden angereichert werden. Nach Ansicht der Experten ist nicht auszuschließen, dass im Laufe der Zeit Kleinlebewesen das Silber aufnehmen und dadurch geschädigt werden.

Deshalb wird auch an Designkriterien für nachhaltige Nanomaterialien gearbeitet. Dafür erforschen Wissenschaftler, wie sich Nanopartikel in Gewässern, Böden und Sedimenten verhalten; ob und wie sie sich im Boden sowie in Pflanzen und Tieren anreichern.

Als großen Fortschritt sehen die Experten vom BfR die EU-Kosmetik-Verordnung, die seit Juli 2013 in Kraft ist. Seither müssen Hersteller Kosmetika, die Nanomaterialien enthalten, der EU-Kommission melden und die entsprechenden Inhaltsstoffe auf der Verpackung mit dem Begriff „Nano“ kennzeichnen. Für Verpackungsfolien oder andere Lebensmittelkontaktmaterialien legt eine seit Dezember 2004 geltende weitere Verordnung fest, dass diese keine Bestandteile enthalten dürfen, die die menschliche Gesundheit gefährden oder die Lebensmittel verändern könnten – das gilt auch für Nanomaterialien.

Forschungsbedarf sehen die BfR-Experten noch im Bereich der Textilien. Eine aktuelle Studie gibt erste Hinweise darauf, dass in Fasern eingeschlossene Nanopartikel nicht so schnell abgegeben werden wie jene, die als Oberflächenbeschichtung auf Materialien einer Jacke oder ei-

nes T-Shirt aufgetragen wurden. Aber viele Fragen sind noch offen. So weiß man nicht, was aus Stoffen abgegebene Silber-Nanopartikel bewirken – ob sie beispielsweise die gesunde Haut passieren können und sich in bestimmten Geweben anreichern. All das wird derzeit untersucht.

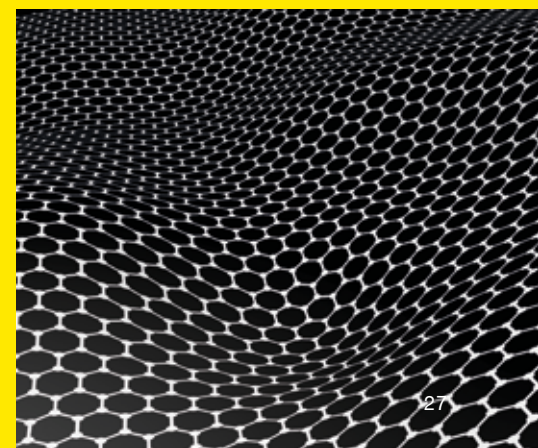
Wenn Nanopartikel fest in Tennisschlägern oder Computerbildschirme eingebunden sind, gehen Experten davon aus, dass sie da auch bleiben. „Vor einer Schicht in meinem Computer, die mit Nanotechnologie hergestellt ist, habe ich keine Angst“, sagt Fraunhofer-Forscher Haas. Problematischer seien Nanopartikel, die eingeatmet werden können. „Da ist noch offen, ob die Partikel die Luft-Blut-Schranke oder weitere Barrieren des Körpers überwinden und ob sie sich in Organen oder Geweben ansammeln.“ Von der Verwendung von Sprays, die Nanopartikel freisetzen, rät das BfR daher ab.

Führende Rolle

Deutschland gehört mit den USA und Japan zu den drei Ländern, in denen Spitzenforschung im Bereich Nanotechnologie betrieben wird. „Innerhalb von Europa führt Deutschland“, betont Haas. Bei der Umsetzung könne man noch aufholen. Daher geht es zukünftig vor allem um die Umsetzung der Visionen in machbare Anwendungen. Durch Forschung muss geklärt werden, welche Anwendungen sich durch Nanotechnologie besser und nachhaltiger nutzen lassen. Und auch die Kosten für die Herstellung müssen weiter reduziert werden.

Spannend bleibt es in den Laboren der Grundlagenforscher. „Die große Preisfrage ist, welche neuen Materialien werden noch gefunden?“, sagt Haas. Da bleibt abzuwarten, was Wissenschaftler mit Tesafilm und hochauflösenden Supermikroskopen noch alles entdecken.

Struktur von Graphen



BRILLANTRING für die

NANO FORSCHUNG

Mit PETRA III betreibt DESY eine der besten Röntgenlichtquellen der Welt. Forschergruppen aus aller Welt nutzen die intensive Röntgenstrahlung für eine Vielzahl von Experimenten – von der Medizinforschung bis zur Nanotechnologie. Doch der 2300 Meter lange Ringbeschleuniger PETRA hat noch mehr Potenzial: Er lässt sich zu einem extrem fokussierten und hochauflösenden 3D-Röntgenmikroskop ausbauen, sagt Christian Schroer, wissenschaftlicher Leiter der Anlage.

femto: PETRA III zählt zur ersten Liga der Röntgenquellen weltweit. Warum ein Ausbau zu PETRA IV?

Schroer: Wir haben die physikalischen Grenzen, die die Röntgenphysik uns setzt, noch längst nicht erreicht. Ein großer Vorteil eines noch stärker gebündelten Röntgenstrahls, den wir durch den Neubau des Speicherrings erhalten, wäre, dass wir alles, was wir heute schon mit PETRA III untersuchen, auch mikroskopisch machen könnten – also Röntgentechnik kombiniert mit Mikroskopie.

femto: Was bedeutet das?

Schroer: Wir können künftig Proben insbesondere auch in ihrem Inneren mit einer räumlichen Auflösung im Nanometerbereich analysieren. Die meisten Proben sind heterogen, und ihre Eigenschaften schwanken von Ort zu Ort. Diese Variationen können wir nur mit einem Röntgenstrahl auflösen, der extrem stark gebündelt ist, so dass wir die Eigenschaften punktgenau messen können.

Momentan hört die Röntgenmikroskopie bei etwa 10 Nanometern auf, das ist derzeit das Beste, was geht. Andererseits gewinnen wir Informationen auf atomarer Ebene, also mindestens zehnmal kleiner,

durch Streuversuche oder spektroskopische Verfahren. PETRA IV kann die Lücke dazwischen genau untersuchen, in der sehr viel Spannendes passiert, weil kleinste Nanoteilchen, beispielsweise für die Katalyse, genau in diesem Längenbereich liegen.

„Wir haben die physikalischen Grenzen, die die Röntgenphysik uns setzt, noch längst nicht erreicht“

femto: Wie schafft es PETRA IV, diese Lücke zu schließen?

Schroer: Die Kunst besteht darin, den Röntgenstrahl so gut zu bündeln, dass quasi alles Licht auf einen Punkt trifft. Nur wenn wir den Strahl so klein machen, können wir das ganze Licht, das aus der Quelle kommt, nutzen. Heute können wir für die Röntgenmikroskopie nur ein Prozent der Strahlung nutzen, die restlichen 99 Prozent werfen wir quasi weg, weil der Strahl für diese Technik nicht fokussiert genug ist.

Im Beschleunigerring werden die Elektronen durch Magnete auf ihrer Kreisbahn gehalten. Und diese magnetische Struktur muss so angepasst werden, dass die Elektronen besonders sanft um die Kurve geführt werden und gleichzeitig extrem stark gebündelt auf einer extrem feinen Bahn bleiben. Das funktioniert umso besser, je größer der Speicherring ist. Und da PETRA mit 2300 Metern Umfang der weltweit größte Ring für die Erzeugung von Röntgenstrahlung ist, haben wir die Möglichkeit, auch den am stärksten gebündelten Strahl zu erzeugen. Das geht aber nur mit neuen, ganz speziellen Beschleunigertechniken, die wir für PETRA IV einsetzen wollen.

femto: Was heißt das für die Nanowissenschaften?

Schroer: Man kann mit PETRA IV wirklich einzelne Nanopartikel anschauen. Heutige Experimente untersuchen häufig pauschal große Mengen von Nanopartikeln. Daraus ergibt sich eine mittlere Information, die aber nicht unbedingt der wahren Information entspricht, wenn die Teilchen sehr unterschiedlich sind. Daher wollen wir individuelle Nanopartikel unter die Röntgenlupe nehmen.

Letztlich werden wir nahezu alle Techniken, die heute für Synchrotronstrahlung verfügbar sind, an PETRA IV orts aufgelöst anwenden können. Das ist natürlich vor allem für die Nanowissenschaften entscheidend, aber auch für die Materialforschung, wenn es um nanostrukturierte Werkstoffe geht.

femto: Für welche Anwendungen ist das relevant?

Schroer: Wichtige Anwendungen sind Katalyse, Batterieforschung, Energieerzeugung, aber auch Mikroelektronik, wenn man sich beispielsweise anschaut, wie Leiterbahnen



Christian Schroer ist wissenschaftlicher Leiter der Röntgenlichtquelle PETRA III (im Hintergrund) bei DESY und Professor an der Universität Hamburg.

oder Transistoren im Detail aussehen. PETRA IV kann aber auch wichtige Beiträge zu den Bio-, Umwelt- und Geowissenschaften liefern.

In der Katalysatorforschung beispielsweise können wir mit PETRA IV einzelne Nanoteilchen bei einer Reaktion beobachten – und das quasi unter Betriebsbedingungen in einem echten chemischen Reaktor. Wir können somit lokal die chemischen und physikalischen Prozesse in einer Probe bis auf die atomare Skala verfolgen.

femto: Nützt das auch der Industrie?

Schroer: Diese Möglichkeiten helfen der Industrie, ganz entscheidende Weichen zu stellen, um neue Produktionsverfahren und Werkstoffe zu entwickeln und Katalysatoren, Batterien oder andere Produkte zu optimieren. Zum Beispiel kann man lokal auf der Nanoskala verfolgen, was in einer Batterie im Betrieb während der typischen Be- und Entladevorgänge passiert. Man kann beobachten, wie und warum sie altert, und Maßnahmen dagegen entwickeln. Das gilt aber auch für die verschiedensten materialwissenschaftlichen Proben, etwa aus Flugzeugtechnik oder Leichtbau, deren

Entstehung und Verschleiß sich mit atomarer Auflösung verfolgen lässt. Die Erkenntnisse der Röntgen-Nanoanalytik ermöglichen zukunftsweisende Anwendungen in der Energie-, Kommunikations- und Sicherheitstechnik, ebenso im Transport- und Gesundheitswesen.

„Mit PETRA IV können wir auf der Nanoskala verfolgen, was in einer Batterie im Betrieb passiert“

femto: Prozesse mit atomarer Auflösung zu verfolgen, das versprechen auch die neuen Freie-Elektronen-Laser, zu denen auch DESYs FLASH und der European XFEL gehören. Wo liegen die Unterschiede?

Schroer: Die Anlagen sind komplementär und ergänzen sich in ihrem Forschungspotenzial. Die Freie-Elektronen-Laser produzieren extrem kurze und intensive Röntgenlaserblitze, mit denen sich echte Momentaufnahmen einer chemi-

schen Reaktion aufnehmen lassen. Viele solcher Schnappschüsse hintereinander geschaltet ergeben quasi einen Film vom molekularen Geschehen – wie ein Daumenkino auf der Zeitskala von milliardstel Sekunden. Allerdings ist nach jedem Schnappschuss die Probe von der hochintensiven Strahlung zerstört, und die Reaktion muss von neuem gestartet werden.

Für einen kurzen Moment ist der Röntgenlaser zehnmilliarden Mal heller als PETRA IV, aber über eine Sekunde betrachtet, sind beide ähnlich hell. Das bedeutet: PETRA IV liefert eine kontinuierlichere Beleuchtung, mit der man Nanopartikel längere Zeit genau verfolgen kann – etwa die Abläufe in einem Katalysator oder einer Batterie. Je nach Fragestellung brauchen Sie den Röntgenlaser oder die Synchrotronstrahlungsquelle.

femto: Wie ist der Stand der Planungen zu PETRA IV?

Schroer: Wir müssen den Beschleuniger innerhalb des bestehenden PETRA-Ringtunnels neu bauen. Die Experimente müssen angepasst oder neu gebaut werden. Zunächst wird es dazu eine Vorbereitungsphase geben. Bis Mitte 2018 wird ein sogenannter Conceptual Design Report erstellt, der das wissenschaftliche und strategische Potenzial aufzeigt und eine technische Lösung für den neuen PETRA IV-Speicherring enthält. Nach einer detaillierten technischen Planung bis 2020 und der Vorbereitung der neuen Komponenten könnte dann die Umbauphase Mitte 2024 beginnen und 2026 abgeschlossen sein.

Gamma-Astronomie-Zentrum

Wissenschaftszentrale des CTA-Observatoriums kommt zu DESY

Wichtiger Schritt für das internationale Großprojekt der Gammastrahlenastronomie CTA (Cherenkov Telescope Array): Die Gesellschafterversammlung der CTAO GmbH hat beschlossen, das Science Data Management Centre und den Sitz des wissenschaftlichen Direktors von CTA am Forschungszentrum DESY in Zeuthen anzusiedeln. Der künftige Verwaltungssitz der CTA-Organisation wird in Bologna, Italien, sein. „Wir sind sehr froh,



Architekturentwurf für das wissenschaftliche CTA-Zentrum auf dem DESY-Campus Zeuthen



Visualisierung zweier Teilchenschauer über dem Feld aus CTA-Teleskopen

dass wir uns im internationalen Bieterprozess durchsetzen und die wissenschaftliche Koordination von CTA nach Deutschland holen konnten“, sagte Beatrix Vierkorn-Rudolph vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und stellvertretende Vorsitzende der Gesellschafterversammlung der CTAO GmbH.

Das Cherenkov Telescope Array ist ein weltweit einzigartiges Projekt zum Bau eines Observatoriums für Gammastrahlenastronomie. Das Observatorium wird aus mehr als

100 Teleskopen bestehen, die jeweils an einem Standort auf der Südhalbkugel und einem auf der Nordhalbkugel aufgestellt werden. Mehr als 1000 Wissenschaftler und Ingenieure aus über 30 Ländern haben sich zusammengeschlossen, um in den nächsten fünf Jahren die Anlage aufzubauen und mindestens 20 Jahre zu betreiben. Verhandlungen über die Standorte in Chile und auf La Palma laufen zurzeit und sollen bis Ende dieses Jahres abgeschlossen werden.

Helmholtz-Preis für Forschung an FLASH

Für Präzisionsmessungen an DESYs Röntgenlaser FLASH haben fünf Forscher der Goethe-Universität in Frankfurt am Main den Helmholtz-Preis für Metrologie bekommen. Das Team um Atomphysiker Reinhard Dörner hat mit einer Spezialapparatur extrem schwach gebundene Helium-Moleküle untersucht. Dabei entdeckten die Wissenschaftler sogar ein vor 40 Jahren vorhergesagtes, bislang jedoch vergeblich gesuchtes Molekül aus drei Helium-Atomen. Der mit 20 000 Euro dotierte Helmholtz-Preis würdigt herausragende Leistungen in der Metrologie (Wis-

senschaft vom Messen) und wird alle drei Jahre vom unabhängigen Helmholtz-Fonds e.V. an europäische Forscher vergeben.

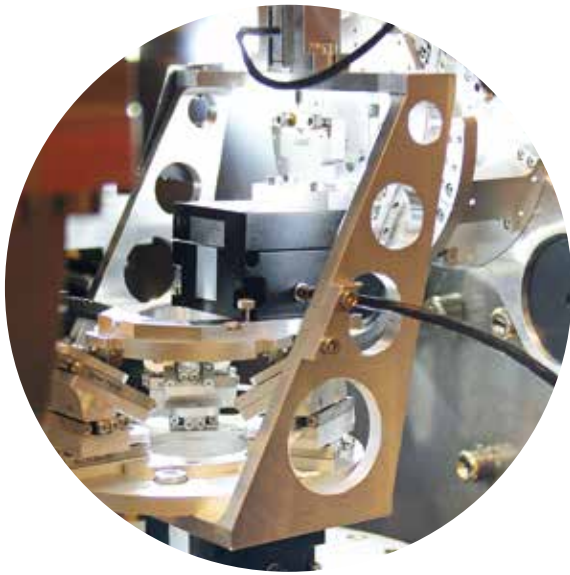
Das Edelgas Helium geht normalerweise keinerlei chemische Bindungen ein und kommt in Form einzelner Atome vor. Unter speziellen Voraussetzungen erlaubt die Quantenphysik jedoch die Bildung sehr schwach gebundener Helium-Moleküle aus zwei oder sogar drei Atomen. Dörner und seinen Kollegen Till Jahnke, Maksim Kunitzki, Jörg Voigtsberger und Stefan Zeller ist es gelungen, mit Hilfe des an der Goethe-Universität entwickelten

Reaktionsmikroskops COLTRIMS (Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy) die winzige Bindungsenergie von He₂-Molekülen auf wenige Nano-Elektronenvolt (neV) genau zu messen.

„Diese ausgezeichnete Arbeit ist ein herausragendes Beispiel für Höchstpräzisionsmessungen und zeigt das enorme Potenzial von DESYs Freie-Elektronen-Laser FLASH“, betont Edgar Weckert, Forschungsdirektor von DESY.



Reinhard Dörner (links) und Maksim Kunitzki am Reaktionsmikroskop



Mit dem sogenannten Nanoindenter lassen sich Spannungen in dünnen Schichten live beobachten.

Livebilder von Materialspannungen

An DESYs Synchrotronstrahlungsquelle PETRA III ist es Forschern erstmals gelungen, in-situ-Spannungsfelder innerhalb von mikroskopisch dünnen Schichten aus metallischen Keramiken zu beobachten. Eine neue Technik ermöglicht es, einen bisher noch nie dagewesenen Live-Blick auf die Auswirkungen von Druck auf atomarer Ebene zu erhalten.

„Wir benutzen eine winzige Diamantspitze, um auf die Proben zu drücken, und dabei durchleuchten wir sie mit Röntgenstrahlen von PETRA III“, erklärt Christina Krywka vom Helmholtz-Zentrum Geesthacht, die den Messplatz gemeinsam mit ihren Kollegen aufgebaut hat. „So eine Untersuchung wollten die Nutzer schon lange machen, allerdings gab es bisher nicht die Möglichkeit dazu.“ Außer einem winzigen Röntgenstrahl mit einer ausreichend hohen Energie benötigen die Wissenschaftler hierfür einen besonderen Aufbau der Probenhalterung. Für den Röntgenstrahl wurden spezielle Optiken benötigt, die ihn auf einen Durchmesser von nur 250 Nanometern fokussieren.

Die neue Technik soll bei der Verbesserung von widerstandsfähigen Beschichtungen helfen. Materialien mit besonderer Widerstandskraft und Festigkeit werden im täglichen Leben immer häufiger verwendet und gebraucht. Die untersuchte metallische Keramik aus Titanitrid kann als nur wenige Mikrometer dünne Schutzschicht unter anderem zum Härten von Werkzeugen benutzt werden.

Scientific Reports, 2016; DOI: 10.1038/srep22670

Erster Undulator im European XFEL

Die 35 Undulatoren des ersten von drei röntgenlichterzeugenden Systemen des Röntgenlasers European XFEL sind installiert. Undulatoren sind die zentralen Bauteile, die beim European XFEL Röntgenblitze erzeugen werden, die milliardenfach heller sind als das Licht konventioneller Röntgenlichtquellen. Die Undulatoren des European XFEL werden in unterirdischen Tunneln montiert. Jeder ist 5 Meter lang, 7,5 Tonnen schwer und verfügt über zwei gegenüberliegende Träger für eine lange Reihe von Permanentmagneten mit abwechselnder Ausrichtung der Pole.

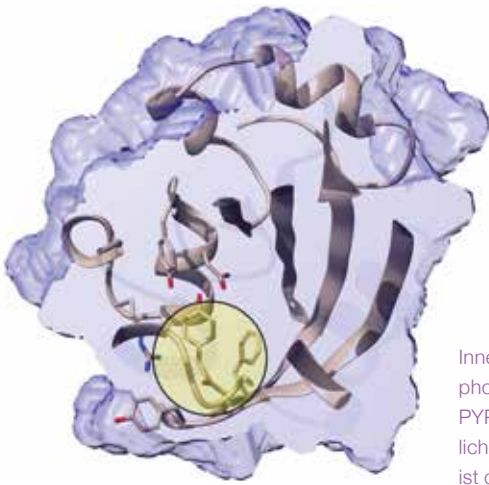
Wenn beschleunigte Elektronen das von den Magneten erzeugte Feld passieren, entstehen ultrakurze Röntgenlichtblitze. Sie sind die Basis für revolutionäre wissenschaftliche Experimente: Wissenschaftler können mit ihnen neue Einblicke in den Nanokosmos gewinnen, für die es Anwendungen auf vielen wissenschaftlichen Gebieten gibt, darunter Biochemie, Astrophysik und Materialwissenschaften.

Die Installation der Undulatoren ist ein wichtiger Schritt zur Fertigstellung des 3,4 Kilometer langen europäischen Röntgenlasers European XFEL, der zur Zeit in der Region Hamburg gebaut wird. Die neue Forschungseinrichtung ist eines der größten Wissenschaftsprojekte in Europa. Sie soll ab 2017 Forschern aus aller Welt zur Verfügung stehen und wird dann die hellste Röntgenlichtquelle der Welt sein.

Die erste Undulatorstrecke des European XFEL



Bild: European XFEL GmbH



Innere Struktur des photoaktiven Proteins PYP. Der lichtempfindliche Chromophor ist durch den Kreis hervorgehoben.

Atombewegungen in Biosensor

Mit einer speziellen Hochgeschwindigkeits-Röntgenkamera hat ein internationales Forscherteam unter Beteiligung von DESY die ultraschnelle Reaktion eines Proteins auf Licht beobachtet. Die Studie zeigt lichtgesteuerte Atombewegungen, die nur 100 milliardstel Sekunden (100 Femtosekunden) dauern. Die verwendete Untersuchungstechnik kann Einblicke in die Dynamik einer Vielzahl lichtempfindlicher Biomoleküle ermöglichen, die an zentralen biologischen Prozessen wie der Photosynthese oder dem Sehen beteiligt sind.

Mit den hellen Blitzen des Röntgenlasers LCLS am US-Forschungszentrum SLAC untersuchten die Forscher den lichtempfindlichen Teil des photoaktiven gelben Proteins PYP (photoactive yellow protein). Es hilft bestimmten Bakterien, blaues Licht zu erkennen, damit sie sich von zu energiereichem Licht fernhalten können.

Für ihre Untersuchungen schleusten die Wissenschaftler die lichtempfindlichen Proteine in eine Reaktionskammer, wo sie von einem blauen Laserblitz aktiviert wurden. Einen kurzen Moment später folgte ein Röntgenlaserblitz, mit dem sich die räumliche Struktur des Proteins auf einzelne Atome genau untersuchen lässt. Indem sie den zeitlichen Abstand der beiden Blitze systematisch variierten, konnten die Forscher analysieren, wie das aktivierte Protein mit der Zeit seine Gestalt verändert. „In der richtigen Ordnung – entsprechend der Zeitverzögerung zwischen optischem und Röntgenlaserblitz – ergeben die Schnappschüsse eine Art Film der Proteinreaktion vom ersten, 100 Femtosekunden langen Schritt bis zu mehreren tausend Femtosekunden“, erläutert Erstautorin Kanupriya Pande von der Universität von Wisconsin in Milwaukee, die inzwischen ans Center for Free-Electron Laser Science CFEL bei DESY gewechselt ist.

Science, 2016; DOI: 10.1126/science.aad5081

Helmholtz Innovation Lab

Grünes Licht für Industriekooperation MicroTCA.4 TechLab

DESY gründet zusammen mit Partnern aus der Wirtschaft das MicroTCA.4 Technology Lab. In der Kooperation soll der neue Elektronikstandard MicroTCA.4 weiterentwickelt und für einen großen Markt etabliert werden. Das Projekt wird als Helmholtz Innovation Lab mit knapp 2,5 Millionen Euro über die nächsten drei Jahre von der Helmholtz-Gemeinschaft gefördert. Mit Mitteln von DESY und Wirtschaft erhöht sich das Budget des Innovation Lab auf 5,07 Millionen Euro. „DESY stellt die Förderung von Innovationen auf dem Campus grundlegend neu auf. Das MicroTCA.4 Technology Lab ist ein wichtiger Baustein in der Innovationsstrategie des Forschungszentrums“, sagt DESY-Direktor Helmut Dosch. „Es wird eine neue Dimension in der Kooperation von DESY mit der Wirtschaft eröffnen“.

Der Elektronikstandard MicroTCA.4 (Micro Telecommunications Computing Architecture) verbindet ultraschnelle Digitalelektronik mit der Möglichkeit, analoge Baugruppen auf kleinstem Raum zu integrieren. Seine enorme Ausfallsicherheit und Skalierbarkeit machen ihn ideal für den Einsatz in der Kontrolle von Teilchenbeschleunigern. Aber auch in der Industrie gibt es zahlreiche Einsatzmöglichkeiten, von der Telekommunikation, Online-Inspektion, Luftfahrt und Medizintechnik bis hin zur Präzisionsmesstechnik.

Elektronikboards nach dem neuen MicroTCA.4-Standard sind universell einsetzbar.



Foto: DESY, Heiner Müller-Eberhard



Bei der Plasma-Beschleunigung wird in einer dünnen Kapillare eine Welle aus elektrisch geladenem Gas erzeugt, ein sogenanntes Plasma. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten, die in verschiedenen Projekten auf dem DESY-Campus in Hamburg erprobt werden. LUX nutzt den 200 Terawatt starken ANGUS-Laser, der ultrakurze Laserblitze in das Wasserstoffgas schießt. Die Laserpulse entreißen den Wasserstoffmolekülen ihre Elektronen, die wie von einem Schneepflug zur Seite gefegt werden. Im Kielwasser des Blitzes sammeln sich die Elektronen und werden von der elektrisch positiv geladenen Plasmawelle vor ihnen beschleunigt – ähnlich wie ein Wakeboard-Surfer in der Heckwelle eines Schiffs.

Erster Elektronenstrahl aus Plasma-Beschleuniger

Ein zukunftsweisendes Beschleunigerprojekt hat bei DESY seinen ersten Elektronenstrahl erzeugt. Die experimentelle Anlage namens LUX ist eine Kooperation mit der Universität Hamburg und beruht auf der vielversprechenden Technik der Plasma-Beschleunigung, die einmal kleinere und stärkere Teilchenbeschleuniger ermöglichen soll. In einem ersten Testbetrieb konnte LUX mit Hilfe einer wenige Millimeter langen Plasmazelle Elektronen auf etwa 400 Mega-Elektronenvolt (MeV) beschleunigen. Das entspricht fast der Energie des 70 Meter langen linearen Vorbeschleunigers LINAC II bei DESY.

„Das Ergebnis ist ein erster wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur Entwicklung kompakter laser-plasmabasierter Beschleunigeranlagen in Hamburg“, betonte DESYs Beschleuniger-Direktor Reinhard Brinkmann. Die LUX-Beschleunigeranlage wurde in der Nachwuchsgruppe von Andreas R. Maier entwickelt und aufgebaut, die Teil der von Florian Grüner geleiteten Beschleunigerphysik der Universität Hamburg am Center for Free-Electron Laser Science CFEL ist. Bis zu einer Anwendung muss die Technik allerdings noch zahlreiche Hürden nehmen. LUX wird im Rahmen der LAOLA-Kooperation von Universität Hamburg und DESY betrieben, in der verschiedene Gruppen beider Institutionen eng zusammenarbeiten, um zukunftsweisende Beschleunigerkonzepte zu erforschen.

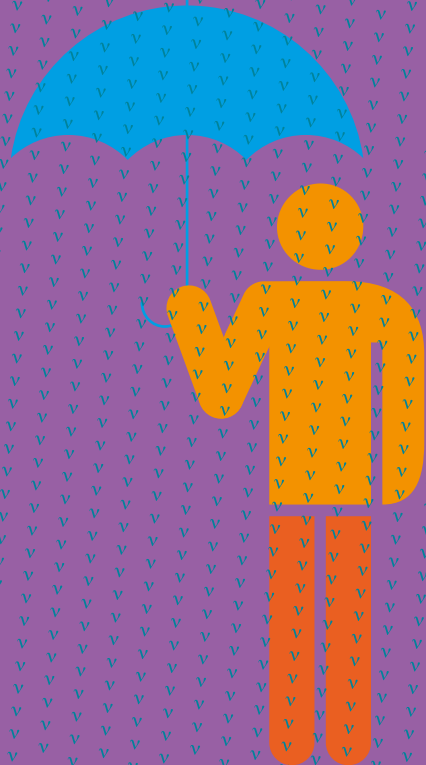
femtomenal

Geisterhaft!

Rund 60 Milliarden Neutrinos rauschen pro Sekunde durch jeden Quadratzentimeter unserer Haut. Das macht aber nichts, denn im Laufe des gesamten Lebens bleiben im Schnitt nur ein bis zwei davon im Körper hängen. Fast alle diese Neutrinos stammen von der Sonne.

Rund 18 000 (18 Nonilliarden) Neutrinos schleudert dagegen ein explodierender Stern in den ersten zehn Sekunden einer Supernova ins All. Rund 99 Prozent der Energie einer Supernova-Explosion wird in Form von Neutrinos ausgestrahlt.

Hochenergetischen Neutrinos aus den Weiten des Kosmos ist der größte Teilchendetektor der Welt auf der Spur: IceCube – ein Kubikkilometer Antarktis-Eis, gespickt mit empfindlichen Sensoren. Die ultraleichten Elementarteilchen zu fangen, ist eine echte Herausforderung, denn diese „Geisterteilchen“ gehen kaum eine Wechselwirkung ein.



Hinweis auf ein neues Teilchen?

Gespannte Erwartung in der Teilchenphysik: In den Daten des vergangenen Jahres vom weltgrößten Teilchenbeschleuniger, dem Large Hadron Collider (LHC) am Genfer Forschungszentrum CERN, haben Forscher eine auffällige Abweichung der Messwerte von der Erwartung beobachtet. Diese Beule im Massenspektrum bei 750 Giga-Elektronenvolt (GeV) könnte womöglich ein Hinweis auf ein unbekanntes Teilchen sein. Es kann sich aber auch um eine statistische Fluktuation handeln, wie der neue CERN-Forschungsdirektor Eckhard Elsen erläutert, der zum Jahresanfang von DESY nach Genf gewechselt ist.

femto: Herr Elsen, zurzeit explodiert die Zahl von Fachartikeln, die versuchen, die beobachtete Abweichung zu deuten oder zu erklären. Sie sind seit Januar Forschungsdirektor am CERN – was kann das Ihrer Meinung nach sein?

Elsen: Zunächst einmal kann es eine statistische Fluktuation sein. Stellen Sie sich vor, Sie sind Trendspotter und auf der Suche nach dem neuesten Modetrend. Sie sehen zwei Leute mit blau-rot-karierten Jacken auf der Straße. Ist das schon ein Trend

oder ist das Zufall? Sie würden sicher erst einmal weiter Ausschau halten und Informationen sammeln, bevor Sie auch in eine solche Jacke investieren.

Genauso ist es am LHC. Wir beobachten an dieser einen Stelle bei 750 GeV mehr Ereignisse als erwartet, einen „Bump“; statistisch ist das bisher nicht signifikant. Es ist schon mal gut, dass die beiden großen Detektoren ATLAS und CMS, die ja unterschiedliche Nachweis-technologien nutzen, beide diese Abweichung sehen. Es ist aller-

Physiker denken in Kurven und Graphen. Sie haben ein sehr präzises Theoriekonstrukt, aufgrund dessen sie ihre Berechnungen und auf Simulationen basierende Vorhersagen machen können, um diese dann später mit Daten aus echten Kollisionen vergleichen zu können. Die Vorhersagen und die echten Daten werden in Kurven, sogenannten Plots, dargestellt. Bei der Analyse der Kollisionsdaten vom LHC vom vergangenen Jahr tauchte auf einmal eine Beule in einer Kurve auf, die aus dem Korridor der Erwartungen herausragt. Ein Hinweis auf ein neues Teilchen?

- beobachtet
- - - erwartet
- eine Standardabweichung
- zwei Standardabweichungen

dings auch so, dass die Ausschläge zwar nahe beieinander liegen, aber vielleicht nicht genau an derselben Stelle sind. Uns fehlen einfach noch weitere Informationen.

Immerhin können wir aber einen Messfehler ausschließen, denn die Messung selbst ist ziemlich deutlich: Die Detektoren sehen Ereignisse mit zwei hochenergetischen Photonen, also Lichtteilchen. Es ist unwahrscheinlich, dass sie diese Signatur falsch interpretieren, diese beiden Photonen stechen prominent unter den Detektorsignalen hervor. Mit mehr Daten werden wir herausfinden, ob der Buckel sich verstärkt oder eingeebnet wird.

femto: Wie lange wird das dauern?

Elsen: Die Teams der beiden Detektoren publizieren gegenwärtig ihre Beobachtungen des letzten Jahres. Der LHC ist nach der Winterpause in diesem Frühjahr wieder angelaufen und – wie es bisher aussieht – in Bestform. Die Experimentalphysiker vergleichen die einlaufenden Messdaten mit denen aus dem letzten Jahr. Mit etwas Glück können wir vielleicht noch im Sommer abschätzen, ob wir hier kurz vor einer neuen Entdeckung stehen, oder ob die Statistik uns einen Streich gespielt hat. Alle Kollegen sind extrem gut vorbereitet und natürlich auch extrem gespannt.

femto: Mal abgesehen von dieser auffälligen Abweichung – was steht denn noch auf der Forschungsliste, bis der LHC 2018 wieder in eine lange Betriebspause geht?

Elsen: Je mehr Kollisionen wir bei der LHC-Designenergie von 13 Tera-Elektronenvolt beobachten, desto bessere statistische Analysen können wir machen, desto deutlicher werden Effekte sichtbar. Mit mehr Daten können wir allerdings auch Teilchen mit höheren Massen besser beobachten, unsere Messempfindlichkeit bei hohen Massen steigt. Dadurch wachsen etwa unsere

Chancen, Hinweise auf supersymmetrische Teilchen – oder weitere Ausschlussgrenzen für diese – zu finden.

Wir wollen das Gebiet solide abstecken und sehen, ob sich etwas Neues darin verbirgt. Bis zur nächsten großen Betriebspause 2018 planen wir, mehr als 100 inverse Femtobarn an Daten zu sammeln. Das wäre das Zwanzigfache dessen, was bisher bei dieser Energie gesammelt wurde, und immer noch ein Mehrfaches der Ausbeute aus der ersten Laufzeit des LHC.

Mit größerer Statistik können die Physiker sich auch auf seltenere Prozesse wie etwa außergewöhnliche Zerfälle schwerer Quarks stürzen, und wir werden natürlich die Eigenschaften des 2012 entdeckten Higgs-Teilchens genauer betrachten. Hier hilft uns sowohl die höhere Kollisionsrate des LHC bei hohen Energien als auch die größere Produktionsrate von Higgs-Teilchen. Die Zerfallsraten sind wie ein Fingerabdruck der Natur des Teilchens: Existiert es als einziges skalares Teilchen, oder gibt es vielleicht Bruder- oder Schwesterteilchen, die dann Hinweise auf eine komplexere Theorie gäben, zum Beispiel ein supersymmetrisches Higgs?

femto: Mal angenommen, die beobachtete Beule ist keine statistische Fluktuation und Sie finden tatsächlich ein neues Teilchen. Das wäre doch eine wissenschaftliche Sensation. Welche der vielen aufgestellten Thesen favorisieren Sie?

Elsen: Ich habe noch keine Theorie gesehen, die diese Messung hundertprozentig plausibel beschreibt. In der Regel klemmt es irgendwo in der Interpretation, und es müssen zusätzliche Annahmen gemacht werden. Das Teilchen – wenn es denn eins ist – zerfällt ja in zwei Photonen. Ausschließlich? Das allein wäre schon spektakulär.

femto: Was wäre daran so spektakulär?



Bild: CERN

CERN-Forschungsdirektor Eckhard Elsen war rund 25 Jahre lang Leitender Wissenschaftler bei DESY und hat unter anderem die Aktivitäten für den geplanten International Linear Collider koordiniert.

Elsen: Wenn es ein neues Teilchen ist, wäre es Physik jenseits des Standardmodells. So etwas gibt es noch nicht, es erinnert an nichts anderes. Bisher hat alles immer ins Standardmodell gepasst, oder die Parameter konnten angepasst werden.

Mit mehreren Entdeckungen der letzten Jahre und Jahrzehnte haben wir im Grunde gerechnet, wir hatten eine Spur, es waren gezielte Suchen. Verstehen Sie mich nicht falsch, es war großartig, das top-Quark oder das Higgs-Teilchen nach langer Suche endlich zu sehen, aber überrascht hat uns deren Nachweis nicht wirklich. Das bei DESY entdeckte b-mixing oder der Nachweis, dass Neutrinos Masse haben, waren da weniger erwartet, allerdings stehen sie nicht im Widerspruch zum Standardmodell. Dieser neue Ausreißer tut das, sollte er sich bewahrheiten – das müssen wir erstmal abwarten.

Vielleicht kleben wir ja auch zu sehr an unseren theoretischen Modellen, müssen einen Schritt zurück machen und neu denken. Es wäre natürlich schön, etwas komplett Neues zu entdecken und alte Modelle über den Haufen zu werfen. Jetzt haben aber zunächst die Experimentatoren das Wort.

Mathematik macht Moleküldynamik sichtbar

Neues Rechenverfahren verbessert Zeitauflösung an Röntgenlasern um das 300-Fache

Mit einem cleveren Rechenverfahren können Forscher die ultraschnellen Bewegungen von Molekülen und andere dynamische Prozesse im Nanokosmos auf eine milliardstel Sekunde genau verfolgen. Einem internationalen Team ist damit ein entscheidender Schritt in der Analyse dynamischer Prozesse gelungen. Ihre Arbeit eröffnet einen vergleichsweise einfachen Weg, elementare Reaktionsabläufe mit einer sehr präzisen Zeitauflösung zu bestimmen. Das Forscherteam um Projektleiter Abbas Ourmazd von der Univer-

sität von Wisconsin in Milwaukee entwickelte dafür ein Rechenverfahren (Algorithmus), mit dessen Hilfe sich aus Daten von Experimenten an Freie-Elektronen-Lasern (FEL) wie DESYs FLASH durch geschicktes Extrahieren neue Informationen gewinnen lassen. DESY-Wissenschaftler Robin Santra vom Hamburger Center for Free-Electron Laser Science CFEL – einer Kooperation von DESY, Universität Hamburg und Max-Planck-Gesellschaft – und seine Kollegen konnten die Ergebnisse durch quantenmechanische Simulationen bestätigen.

„Die Methode hat ein unglaubliches Potenzial“, erläutert Santra, der auch Professor an der Universität Hamburg ist. Sie ermögli- che völlig neue Einblicke in den Ablauf zahlreicher ultraschneller Reaktionen in Chemie und Biochemie bis hin zu elektrochemischen Anwendungen oder industriellen Prozessen. Bereiche, in denen Wissenschaftler bisher über den zeitlichen Ablauf auf mikroskopischer Ebene nur spekulieren konnten. „Dynamische Zeitmessungen an FELs unterliegen einer extremen Unschärfe“, erklärt Santra. „Diese neue Datenanalyse erhöht die Genauigkeit um einen Faktor 300 – das ist verblüffend.“

„Diese neue Datenanalyse erhöht die Genauigkeit um einen Faktor 300 – das ist verblüffend“

Robin Santra, DESY

Schnappschüsse ohne Reihenfolge

Chemische Reaktionen und Biomolekülbewegungen laufen unvorstellbar schnell ab und entziehen sich unserem natürlichen Sehen. Sie geschehen im Bereich von Femtosekunden, also milliardstel Sekunden. Bisher gibt es keine effektiven Wege, solche molekularen Prozesse detailliert zu beobachten. Moderne Freie-Elektronen-Röntgenlaser ermöglichen zwar Belichtungszeiten im Bereich von Femtosekunden, mit ihnen lassen sich jedoch keine unmittelbaren Filme von dynamischen Prozessen machen, lediglich eine Reihe von Momentaufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten des untersuchten Prozesses.

Der Aufnahmezeitpunkt der Einzelbilder lässt sich allerdings nicht absolut exakt festlegen. Der Grund dafür: Wollen Forscher eine Reaktion untersuchen, lösen sie diese durch einen optischen Laserblitz aus, ein kurz darauf folgender Röntgenlaserblitz schießt einen Schnappschuss davon. Danach ist die Probe jedoch zerstört, und die Reaktion muss in einer neuen, nahezu identischen Probe noch einmal ausgelöst werden. Der Röntgenlaser blitzt jetzt zu einem etwas späteren Zeitpunkt der Reaktion – und so geht es immer weiter. Als Ergebnis erhalten die Forscher unzählige Momentaufnahmen, die sie anschließend aneinanderreihen müssen wie in einem Daumenkino. Allerdings ist die exakte zeitliche Abfolge der Röntgenlaser-Bilder nicht immer klar erkennbar, Experten bezeichnen diese Genauig-

Robin Santra ist Leitender Wissenschaftler bei DESY und Professor an der Universität Hamburg. Er leitet die Theoriegruppe im Center for Free-Electron Laser Science CFEL.



keitsschwankung als Jitter (engl. für Fluktuation oder Schwankung). Dieser Jitter kann zu einer falschen Sortierung der Einzelbilder im Daumenkino führen.

Zwölf Millionen Dimensionen

„Die zeitliche Unschärfe ist in vielen Bereichen der Wissenschaft ein Fluch“, sagt Ourmazd. „Man hat zwar eine Menge Daten, aber ohne genauen Zeitstempel.“ Denn damit die Momentaufnahmen den Reaktionsverlauf mit einer Genauigkeit von Femtosekunden dokumentieren können, müssen optischer Laser und Röntgenlaser extrem präzise aufeinander abgestimmt sein. „Alle uns bisher bekannten experimentellen Lösungen haben es nicht geschafft, eine Zeitauflösung von besser als etwa 14 Femtosekunden zu liefern, wobei die meisten lediglich 60 Femtosekunden oder länger erreichen“, sagt Santra.

„Die zeitliche Unschärfe ist in vielen Bereichen der Wissenschaft ein Fluch. Man hat zwar eine Menge Daten, aber ohne genauen Zeitstempel“

Abbas Ourmazd, Universität Wisconsin, Milwaukee (USA)

Daher wählten Ourmazd und sein Team einen anderen Weg: Sie entwickelten einen mathematischen Algorithmus, mit dessen Hilfe sie aus vorhandenen Daten Informationen mit einer zeitlichen Genauigkeit von einer Femtosekunde extrahieren können. Die einzelnen Schnappschüsse mit nicht scharf definiertem Zeitstempel werden dazu mathematisch als einzelne >>

› Punkte in einem hochdimensionalen Raum dargestellt – in der jetzt veröffentlichten Arbeit hat dieser Raum rund zwölf Millionen Dimensionen. Mit Hilfe mathematischer Mustererkennungsprozesse reduzieren die Forscher dann die Zahl der Dimensionen, indem sie gekrümmte mehrdimensionale Flächen suchen, auf denen die Punkte liegen. Ziel ist es dabei, schließlich eine – eindimensionale – Kurve zu finden, auf der alle Punkte liegen. Denn wenn sich die einzelnen Punkte nur durch die Änderung eines Parameters unterscheiden, in diesem Fall der Zeit, dann müssen sie eine Kurve im betrachteten Raum bilden. Gelingt es, diese Kurve zu finden, hat man die Punkte zeitlich geordnet.

In der jetzt veröffentlichten Studie untersuchten die Wissenschaftler mit ihrem Algorithmus Daten einer Forschergruppe um den Stanford-Wissenschaftler Philip Bucksbaum. Sein Team hatte im Jahr 2010 mit dem Freie-Elektronen-Röntgenlaser LCLS (Linac Coherent Light Source) am SLAC National Accelerator Laboratory in Kalifornien die Dynamik von doppelt elektrisch geladenen Stickstoffmolekülen erforscht. Diese ungewöhnlichen Stickstoffionen erzeugten die Wissenschaftler durch den Beschuss mit Röntgenstrahlung. Aber auch in der Atmosphäre entstehen diese Ionen durch die Wirkung der energiereichen kosmischen Strahlung, die beständig aus dem Weltall auf die Erde einprasselt.

Das Ergebnis des Experiments: eine große Anzahl von Schnappschüssen unterschiedlicher Schwingungszustände intakter und auseinandergebrochener Stickstoffmoleküle, deren zeitliche Reihenfolge jedoch nicht klar erkennbar war. Ourmazd und seinen Kollegen gelang es nun mit Hilfe ihres Algorithmus, die Schwingungsbewegungen der Moleküle mit einer Genauigkeit von einer Femtosekunde zu bestimmen. Damit konnten sie das dynamische Verhalten der Stickstoffmoleküle mit einer um den Faktor 300 verbesserten Präzision rekonstruieren.

Revolutionäre Analysetechnik

Santra und sein Team am CFEL führten anschließend die quantenmechanische Berechnung der untersuchten Prozesse durch und bestätigten die erzielte Genauigkeit von einer Femtosekunde. „Das schließen wir daraus, dass die extrahierten Schwingungsperioden mit exakt dieser Genauigkeit mit unseren quantenmechanischen Rechnungen übereinstimmen“, sagt Santra. Und nicht nur das: Erst durch die Simulationsrechnungen von Santras Team konnten die Forscher überhaupt sagen, woher die im Experiment beobach-

teten Schwingungen kamen, was sie bedeuten sowie wann und warum die doppelt geladenen Stickstoffmoleküle auseinanderbrechen.

Mit der neuen Datenanalysetechnik lassen sich nicht nur zukünftige Experimente präziser auswerten. Auch bereits vorhandene Messungen können neu analysiert werden. Einzige Voraussetzung: Die Menge der Daten muss ausreichend sein. Das sei bisher vor allem bei der Untersuchung dreidimensionaler Strukturen problematisch, erläutern die Forscher. Wie beispielsweise in der Kristallographie, wo schon für ein Einzelbild eine Unmenge Röntgenblitze nötig sind, um einen statistisch signifikanten Datensatz zu erhalten. „Vielleicht wird dieses Problem zukünftig durch den European XFEL gelöst“, sagt Santra. Der 3,4 Kilometer lange Freie-Elektronen-Röntgenlaser, der derzeit im Hamburger Westen gebaut wird, erzeugt noch 100-mal mehr Lichtblitze pro Zeiteinheit als bisherige FELs.

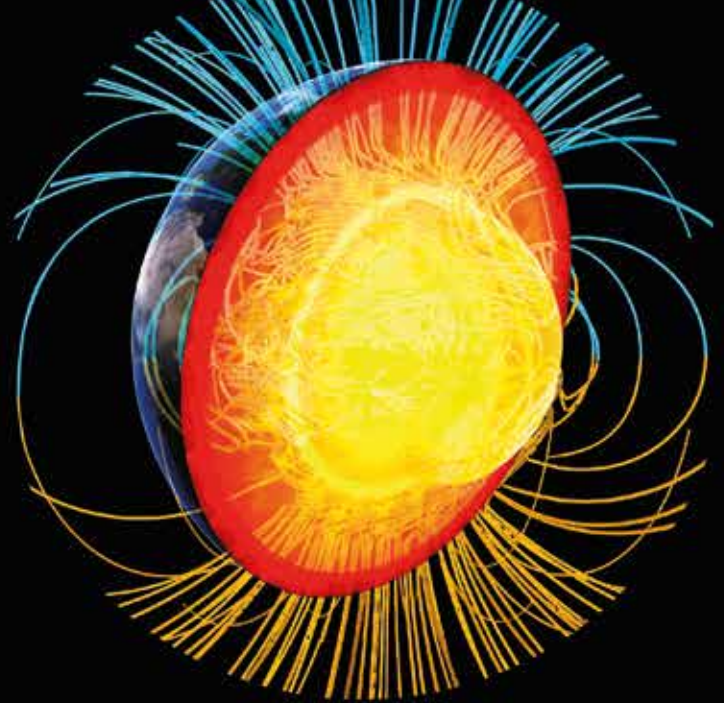
„Diese Methode hat das Zeug, die Forschung an FELs zu revolutionieren“

Robin Santra, DESY

„Diese Methode hat das Zeug, die Forschung an FELs zu revolutionieren“, sagt Santra. Und sie hat einen großen Vorteil: Sie arbeitet nicht mit aufwendigen technischen Lösungen, sondern setzt stattdessen sehr geschickt mathematische Operationen ein. „Dieser Weg ist nicht nur einfacher, sondern auch noch erfolgreicher, weil die Ergebnisse viel exakter sind“, sagt Santra. Der Physiker sieht zahlreiche Anwendungsgebiete. „Die Methode lässt sich als sehr viel präziseres Werkzeug überall dort einsetzen, wo man wissen möchte, wie sich Materie verhält – dynamisch gesehen auf kurzen Zeitskalen.“ Darunter etwa Enzym-Reaktionen in der Biologie und der Chemie, aber auch die Erforschung ungewöhnlicher Materiezustände, wie sie im Inneren von Planeten und Sternen auftreten. Projektleiter Ourmazd geht noch weiter und hofft, mit seinem Algorithmus eine Vielzahl von Zeitreihen wie etwa vergangene klimatische Ereignisse präziser bestimmen zu können.

.....
Nature, 2016; DOI: 10.1038/nature17627

Was treibt den Dynamo im Erdkern an?



Das Magnetfeld der Erde existiert seit mindestens 3,4 Milliarden Jahren auch dank der niedrigen Wärmeleitfähigkeit von Eisen im Kern unseres Planeten. Das ist das Ergebnis der ersten direkten Messung der Eisen-Wärmeleitfähigkeit bei Drücken und Temperaturen, die den Bedingungen im Erdkern entsprechen.

Der Geodynamo, der das Erdmagnetfeld erzeugt, speist sich aus der Konvektion im äußeren Erdkern, die das flüssige, elektrisch leitfähige und eisenreiche Material dort umwälzt wie kochendes Wasser in einem Topf. Kombiniert mit der Erdrotation entsteht ein Dynamoeffekt, aus dem wiederum das Erdmagnetfeld resultiert. „Das Erdmagnetfeld schirmt uns von gefährlichen energiereichen Teilchen aus dem All ab, der sogenannten kosmischen Strahlung. Seine Existenz ist einer der Faktoren, die unseren Planeten bewohnbar machen“, erläutert DESY-Forscherin Zuzana Konôpková. „Daher waren wir an der Wärmeleitfähigkeit von Eisen interessiert, um das Energiebudget des Erdkerns zum Betrieb des Dynamos zu bestimmen. Die Erzeugung und Erhaltung des Magnetfelds unseres Planeten hängt stark von der Wärmedynamik im Kern ab.“

Die Stärke der Konvektion im äußeren Erdkern hängt vom Wärmetransfer aus dem Kern in den Erdmantel ab sowie von der Wärmeleitfähigkeit des Eisens im äußeren Erdkern. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter den Bedingungen, die denen im Erdkern ähneln, hat sich in der Vergangenheit allerdings als schwierig erwiesen. Neuere theoretische Berechnungen lieferten eine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit von bis

zu 150 Watt pro Meter pro Kelvin (150 W/m/K) für Eisen im Erdkern.

Eine derart hohe Wärmeleitfähigkeit würde jedoch die Chancen verringern, dass der Dynamoeffekt frühzeitig einsetzt. Numerischen Modellrechnungen zufolge hätte der Geodynamo bei einer derart hohen Wärmeleitfähigkeit von Eisen erst relativ kürzlich in der Erdgeschichte entstehen dürfen, vor etwa einer Milliarde Jahren. Die Existenz des Erdmagnetfelds lässt sich jedoch anhand von altem Gestein mindestens 3,4 Milliarden Jahre zurückverfolgen. „Es gibt eine heftige Debatte unter Geophysikern, denn mit so einer hohen Wärmeleitfähigkeit wird es schwer, die Geschichte des Erdmagnetfelds zu erklären, die sich aus urzeitlichem Gestein ablesen lässt“, sagt Konôpková.

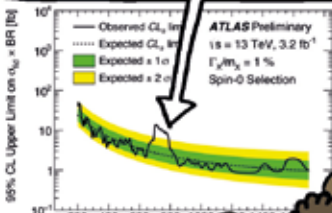
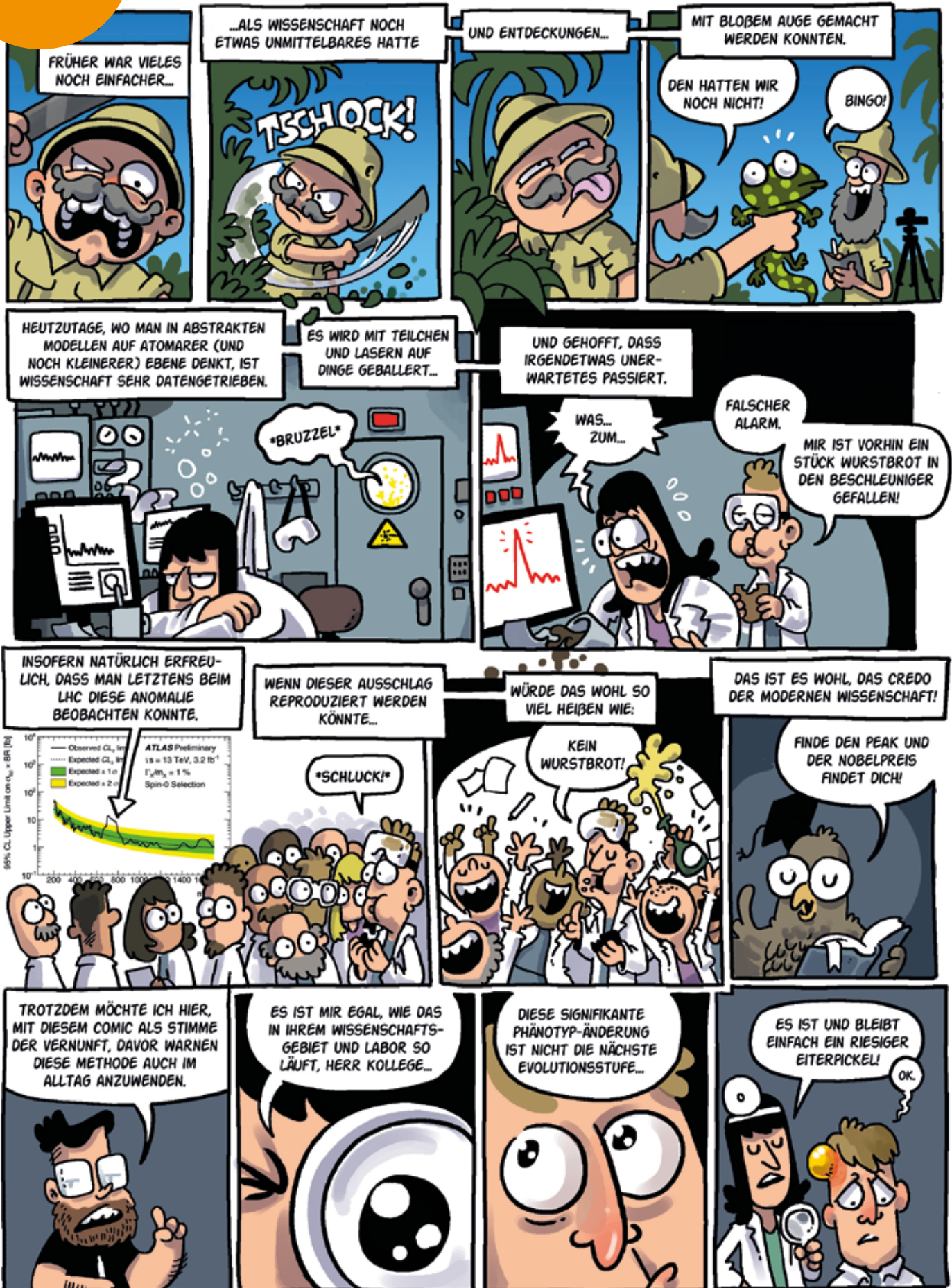
Die DESY-Physikerin und ihre Kollegen Stewart McWilliams und Natalia Gómez-Pérez von der Universität Edinburgh sowie Alexander Goncharov von der Carnegie-Institution in Washington nutzten eine spezielle Hochdruckzelle, um die Eisen-Wärmeleitfähigkeit bei hohen Temperaturen und hohen Drücken direkt bestimmen. „Wir haben eine dünne Eisenfolie in der Diamantstempelzelle mit einem Druck von 130 Gigapascal zusammengepresst, das ist über eine Million Mal so hoch wie der Atmosphärendruck und entspricht ungefähr dem Druck an der

Querschnitt durch die Erde, kombiniert mit den Feldlinien des Erdmagnetfelds (simuliert vom Glatzmaier-Roberts-Geodynamo-Modell)

Grenze von Erdmantel und Erdkern“, erläutert Konôpková. „Gleichzeitig haben wir die Folie mit zwei Infrarotlasern durch die Diamanten auf bis zu 2700 Grad Celsius aufgeheizt. Dann haben wir mit einem dritten Laser einen schwachen Puls auf eine Seite der Folie geschossen, der eine thermische Störung ausgelöst hat. Die folgende Temperaturentwicklung haben wir schließlich von beiden Seiten der Folie mit einer optischen Streifenkamera beobachtet.“ So konnten die Wissenschaftler die Wanderung des Wärmepulses durch das Eisen verfolgen.

Diese Messungen fanden bei verschiedenen Drücken und Temperaturen statt. „Unsere Ergebnisse widersprechen den theoretischen Berechnungen deutlich“, berichtet Konôpková. „Wir haben sehr niedrige Werte von 18 bis 44 Watt pro Meter pro Kelvin für die Wärmeleitfähigkeit gemessen, wodurch sich das Paradox auflösen und der Geodynamo seit der Frühzeit der Erde funktionstüchtig sein kann.“

.....
Nature, 2016; DOI: 10.1038/nature18009



Impressum

femto wird herausgegeben vom
Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY,
einem Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Redaktionsanschrift

Notkestraße 85, D-22607 Hamburg
Tel.: +49 40 8998-3613, Fax: +49 40 8998-4307
E-Mail: femto@desy.de
Internet: www.desy.de/femto
ISSN 2199-5184

Redaktion

Ute Wilhelmsen (v.i.S.d.P.), Till Mundzeck

An dieser Ausgabe haben mitgewirkt

Kristin Hüttmann, Barbara Warmbein

Gestaltung und Produktion

Diana von Ilseman

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

Juni 2016

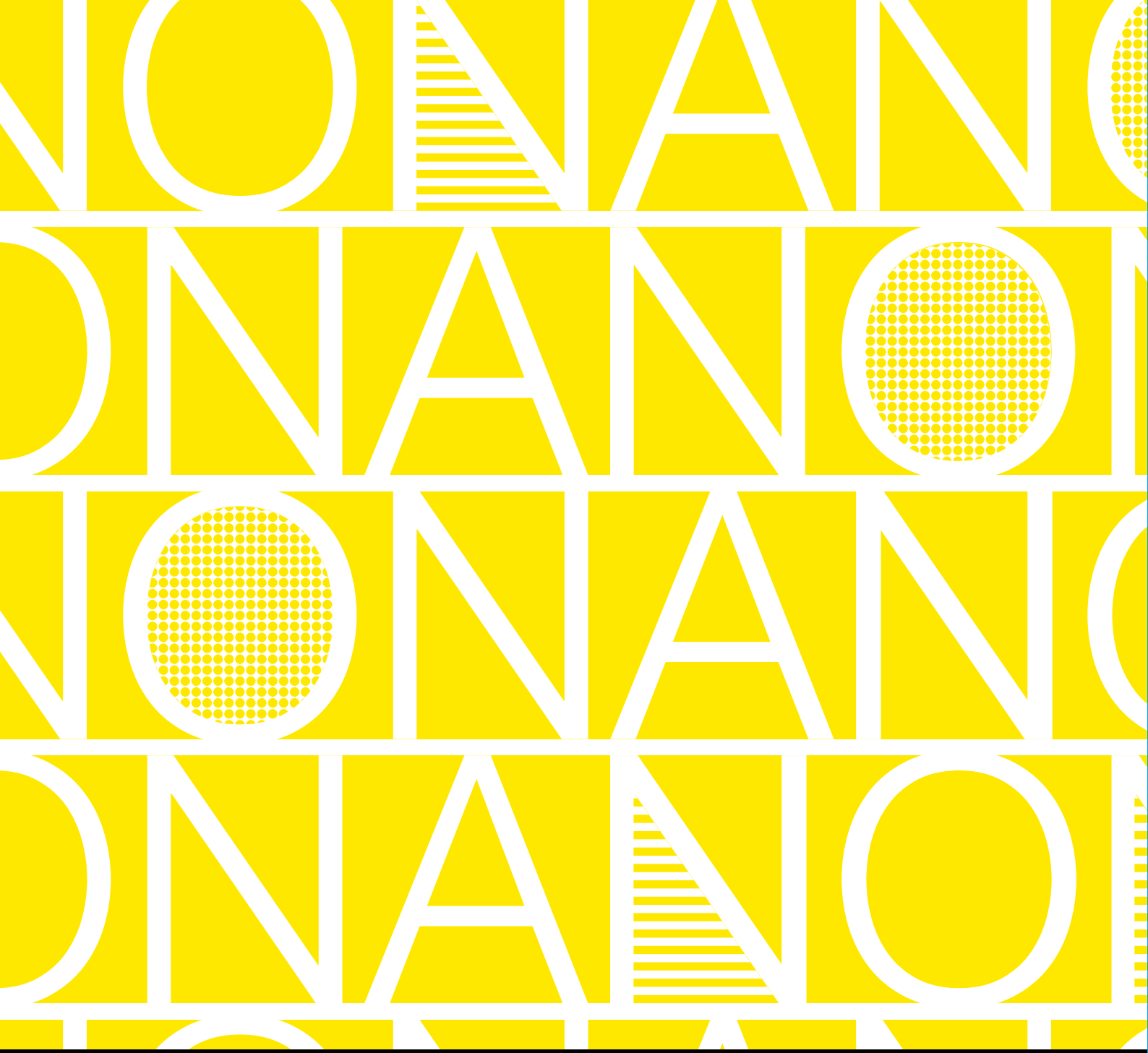
femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie
femto kostenlos!

www.desy.de/femto oder 040 8998-3613





Das Forschungszentrum DESY

DESY zählt zu den weltweit führenden Beschleunigerzentren. Mit den DESY-Großgeräten erkunden Forscher den Mikrokosmos in seiner ganzen Vielfalt – vom Wechselspiel kleinster Elementarteilchen über das Verhalten neuartiger Nanowerkstoffe bis hin zu jenen lebenswichtigen Prozessen, die zwischen Biomolekülen ablaufen. Die Beschleuniger und die Nachweisinstrumente, die DESY an seinen Standorten in Hamburg und Zeuthen entwickelt und baut, sind einzigartige Werkzeuge für die Forschung: Sie erzeugen das stärkste Röntgenlicht der Welt, bringen Teilchen auf Rekordenergien und öffnen völlig neue Fenster ins Universum.