

# femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 02|14

## Surfen auf der Plasmawelle

Die neue Beschleunigertechnologie ist klein, kompakt und leistungsstark

## Extrem flexibel

Die neuen Solarzellen kommen von der Rolle

## Bakterienfresser

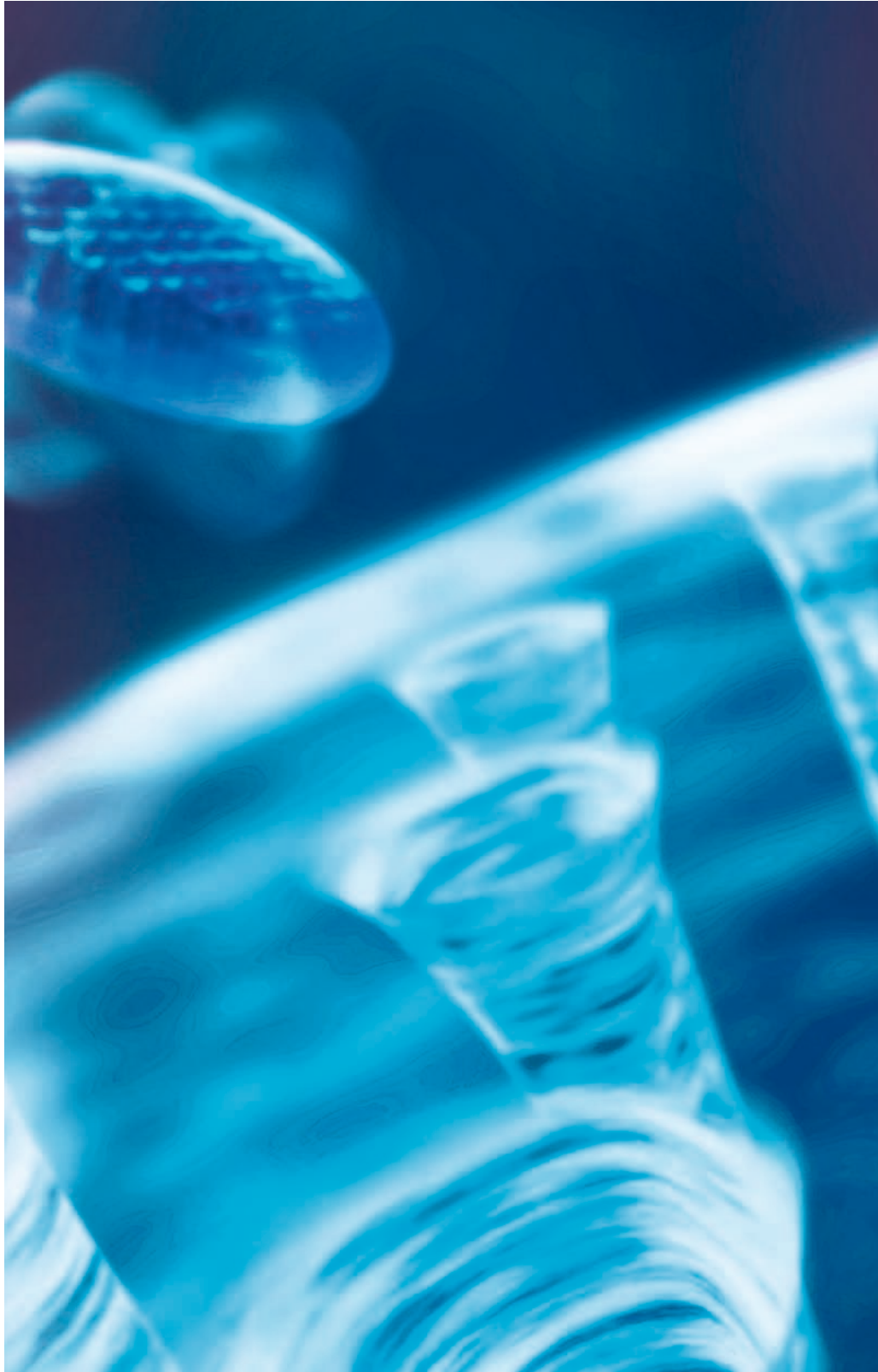
Wie Viren die bakterielle Zellwand angreifen

SCHWERPUNKT

## ZEIG DICH

Der weltgrößte Beschleuniger LHC macht sich auf die Suche nach SUSY-Teilchen, den Bausteinen für ein neues Weltbild





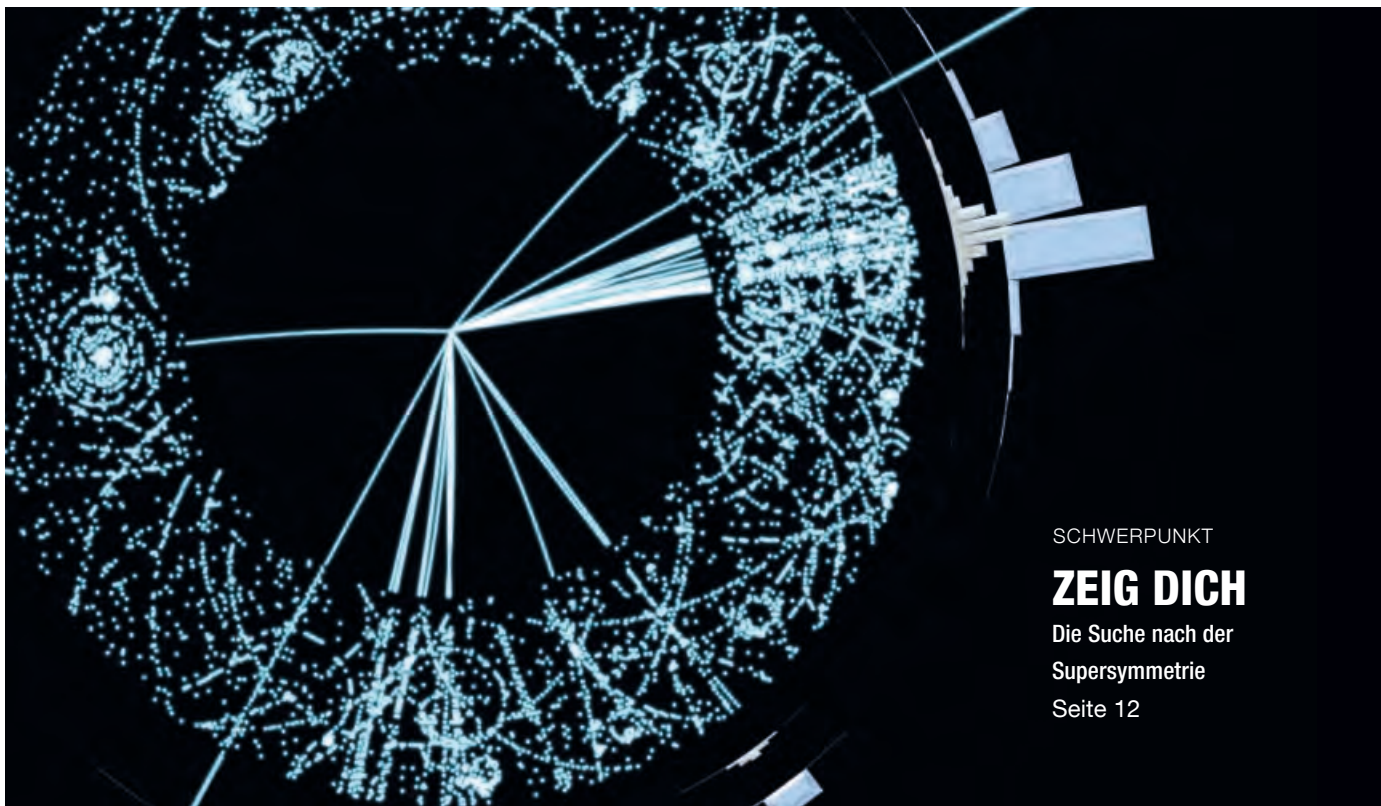
## Quantenstrudel in Nanotröpfchen

Ein Wasserstrudel, der statt an einem Badewannenabfluss in einem Wassertropfen rotiert? Das wäre ein ungewöhnliches Phänomen. Noch exotischer muten die winzigen Quantenstrudel an, die sich in kalten Tröpfchen aus flüssigem Helium bilden. Ein internationales Forscherteam unter Beteiligung von DESY-Wissenschaftlern hat solche Strudel erstmals in Nanotröpfchen, die einen Durchmesser von nur 0,2 bis 2 tausendstel Millimetern haben, nachgewiesen und charakterisiert.



Bild: SLAC National Accelerator Laboratory

Das Edelgas Helium wird bei minus 269 Grad Celsius flüssig. Unterhalb von minus 271 Grad tritt ein Quanteneffekt auf, durch den das flüssige Helium jede innere Reibung verliert, es wird supraflüssig. In diesem exotischen Zustand kann es sogar Wände hinaufkriechen. Um die Dynamik von supraflüssigem Helium zu erkunden, haben die Forscher winzige Helium-Nanotöpfchen mit dem Röntgenlaser LCLS am US-Beschleunigerzentrum SLAC durchleuchtet. Sie sprühten dazu flüssiges Helium durch eine feine Düse in eine Vakuumkammer. Weil sich die Tröpfchen in der Düse ausdehnen, fangen sie an zu rotieren, und zwar bis zu 14 Millionen Mal pro Sekunde – weit schneller als ein normaler runder Tropfen es nach den Gesetzen der klassischen Physik aushalten könnte. Durch die schnelle Rotation formten sich im Inneren der Nanotöpfchen viele kleine Quantenstrudel. Die Forscher wollen jetzt den Ursprung dieser Quantenrotation verstehen und sie letztlich kontrollieren.



SCHWERPUNKT

## ZEIG DICH

Die Suche nach der  
Supersymmetrie  
Seite 12

---

# Inhalt

femto – das DESY-Forschungsmagazin    Ausgabe 02|14

---

SCHWERPUNKT

## ZEIG DICH

Die Suche nach der Supersymmetrie

Diese Theorie hat es in sich: SUSY, die Supersymmetrie, würde auf einen Schlag eine ganze Reihe von Rätseln im Universum lösen – wenn sie denn stimmt. Der weltgrößte Beschleuniger LHC macht sich auf die Suche nach SUSY-Teilchen, den Bausteinen für ein neues Weltbild.

- 14 **Zu schön, um falsch zu sein**  
Was SUSY, die Supersymmetrie, für die Teilchentheoretiker so anziehend macht
- 20 **Die SUSY-Suche**  
Wie Physiker mit dem weltgrößten Beschleuniger nach der Supersymmetrie fahnden
- 25 **Physik jenseits des Standardmodells**  
Interview mit CERN-Generaldirektor Rolf Heuer
- 27 **Die große Vereinheitlichung**  
DESY-Teilchenphysikdirektor Joachim Mnich über den langen Weg zur „Weltformel“



Viren als Bakterienfresser  
Seite 6



Surfen auf der Plasmawelle  
Seite 34

**6 Viren als Bakterienfresser**

Wie Bakteriophagen die bakterielle Zellwand angreifen

**9 Flexibel, vielseitig, innovativ**

Tandem-Solarzellen unter dem Röntgenmikroskop

**34 Surfen auf der Plasmawelle**

Die neue Beschleunigertechnologie ist klein, kompakt und leistungsstark

**40 Abguss statt Original**

Per Zufall entlarvten Archäologen bei DESY eine spektakuläre Fälschung

**41 Livebilder aus dem Nanokosmos**

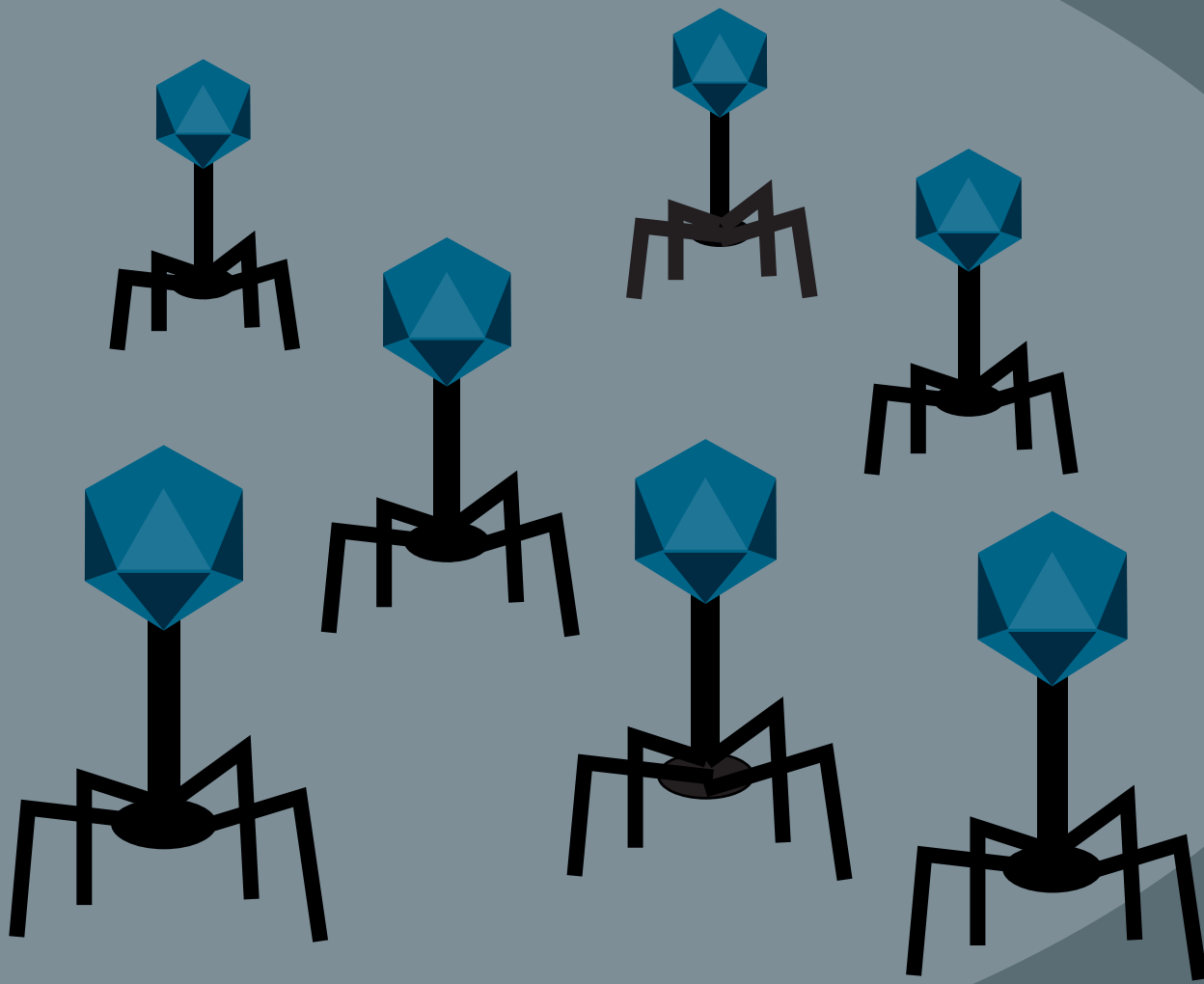
Forscher sehen Schichten aus Fußballmolekülen beim Wachsen zu

RUBRIKEN

- 2 femtoskop Quantenstrudel in Nanotröpfchen
- 11 femtopolis Ein Maulwurf für Module
- 33 femtomenal 5 368 709 120 Bit pro Sekunde
- 42 femtocartoon Brauchen Bakterienkiller auch mal eine Auszeit? Fragt sich Johannes Kretzschmar

30 SPEKTRUM

Neues Gründerzentrum am DESY-Campus ... Forscher entwickeln neuen Typ von Röntgenlinse ... Jedes einzelne Elektron zählt ... Flüssig bei minus 46 Grad Celsius ... Lipidmoleküle in Bewegung ... Photosynthese in Aktion ... Big Data



## Viren als Bakterienfresser

Röntgenuntersuchung zeigt, wie Bakteriophagen die bakterielle Zellwand angreifen

Es gibt Viren, die machen nicht uns krank, sondern unsere Krankmacher. Sie heißen Bakteriophagen, griechisch für Bakterienfresser, und ihr Name ist Programm: Sie infizieren ausschließlich Bakterien, wobei jeder Phage auf bestimmte Arten spezialisiert ist. Man kennt sie seit hundert Jahren und findet sie nahezu überall, wo auch Bakterien häufig sind. Die wie kleine Roboter anmutenden Viruspartikel schleusen ihr Erbgut in eine Bakterienzelle und programmieren diese so um, dass sie Proteine für neue Phagen produziert. Schließlich löst sich die Zelle auf und entlässt lauter Phagen, die wiederum weitere Bakterien infizieren.

Wie Mini-Roboter kommen bestimmte Viren daher, die es auf Bakterienzellen abgesehen haben. In dem eckigen Kopfteil befindet sich ihre Erbsubstanz.

## Angesichts wachsender Antibiotikaresistenzen können Bakteriophagen und ihre Enzyme eine vielversprechende Alternative bieten

Weil die Phagen so zielgenau wirken, lassen sie sich einerseits sehr effizient gegen krankmachende Bakterien einsetzen. Andererseits ist ihre Anwendung bislang aufwendig, weil zunächst die Bakterien in einem Infektionsherd analysiert, dann die passenden Phagen gefunden, aufbereitet und über einen längeren Zeitraum angewendet werden müssen. Antibiotika führen einfacher und schneller zum Erfolg – es sei denn, die Bakterien sind dagegen resistent. In Krankenhäusern sind die multiresistenten Keime berüchtigt, gegen die kaum ein Mittel mehr hilft, und insbesondere die industrielle Massentierhaltung produziert durch ihren hohen Antibiotikaeinsatz eine Vielzahl resistenter Bakterien, die auch für den Menschen eine ernsthafte Bedrohung darstellen. Grund genug also, den Bakterienfressern wieder mehr Aufmerksamkeit zu widmen, wenn es darum geht, Alternativen zu Antibiotika bei der Bekämpfung von Infektionen zu finden.

Auf welche Weise Bakteriophagen den lebensbedrohlichen Durchfallkeim *Clostridium difficile* abtöten, haben Forscher des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie EMBL an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III untersucht. Sie konnten zeigen, wie bestimmte Enzyme dieser Viren ausgeschüttet werden, um die Zellwand der Bakterien aufzulösen. Solche grundlegenden Erkenntnisse helfen dabei, neue Therapien mit Bakteriophagen zu entwickeln, wie der Leiter des EMBL-Teams, Rob Meijers, erläutert: „Angesichts wachsender Antibiotikaresistenzen können Bakteriophagen und ihre Enzyme eine vielversprechende Alternative bieten. Unsere Ergebnisse können uns helfen, wirkungsvolle, spezialisierte Bakteriophagen zu entwickeln, nicht nur für Infektionen mit *Clostridium difficile*, sondern für ein breites Spektrum von Bakterien, die für Gesundheit, Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie von Bedeutung sind.“

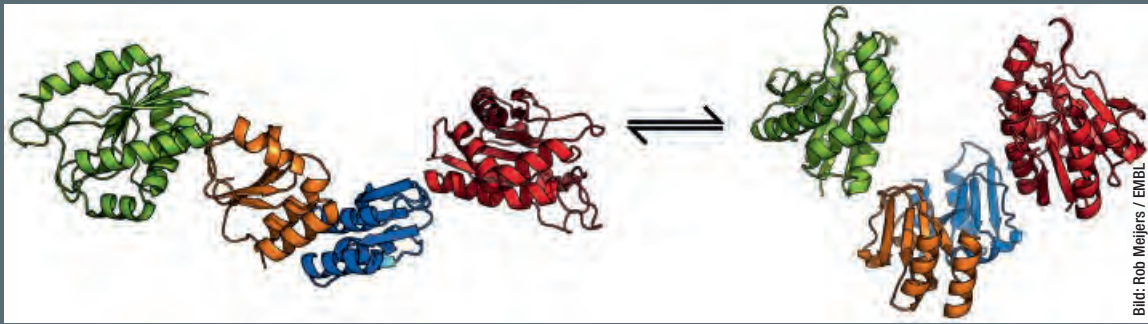
Das Bakterium *Clostridium difficile* wird wegen zunehmender Resistenzen in vielen Kliniken und anderen Gesundheitseinrichtungen zu einem ernsthaften Problem. Es kann lebensgefährliche Durchfälle auslösen, insbesondere bei Patienten, die aus anderen Gründen eine Breitspektrum-Antibiotikatherapie erhalten. *Clostridium difficile*



Ein *Clostridium-difficile*-Bakterium unter dem Elektronenmikroskop

gehört zur normalen menschlichen Darmflora und ist für gesunde Menschen unproblematisch. Bei einer Behandlung mit Antibiotika wird jedoch ein Großteil der normalen Darmflora abgetötet, so dass sich die widerstandsfähigeren *Clostridium-difficile*-Keime unter Umständen unkontrolliert vermehren können, was zu Komplikationen wie schweren Fällen von Durchfall führen kann. Die gemeldete Zahl solcher schweren Verläufe hat sich nach Daten des Berliner Robert Koch-Instituts von 2008 bis 2013 in Deutschland verdreifacht.

Diese Fälle sind oft schwer zu behandeln, weil die Durchfallkeime auf viele Antibiotika nicht mehr



Die untersuchten Endolysine werden aktiviert, indem sie von einem gestreckten Zustand (links) in einen gelösten (rechts) umschalten.

## Das Umschalten von einem Zustand zum anderen setzt das Enzym frei, das dann beginnt, die bakterielle Zellwand abzubauen

ansprechen. Eine mögliche Behandlungsalternative wären Bakteriophagen. Doch bislang sind sie schwer zu kontrollieren, und auch gegen Phagen können Bakterien rasch Resistenzen entwickeln. Für die Entwicklung einer wirksamen Therapie mit Bakteriophagen müssen Forscher daher den Lebenszyklus dieser Viren noch genauer verstehen – insbesondere, wie die Viren die Zellwand der Bakterien zerstören. Zwar ist bekannt, dass die Bakteriophagen dazu Enzyme namens Endolysine produzieren. Wie diese Enzyme jedoch aktiviert werden, ist ein fehlender wichtiger Stein des Puzzles.

### Attacke auf die Bakterienzellwand

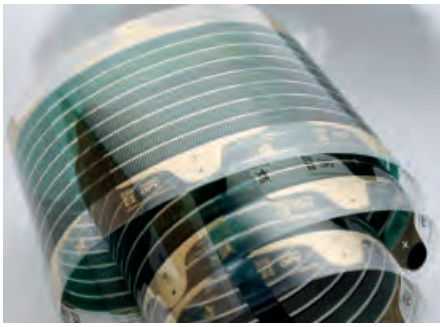
Mit dem intensiven Röntgenlicht von DESYs Forschungslichtquelle PETRA III haben die Wissenschaftler nun einen Aktivierungsmechanismus von Endolysinen entdeckt, die Bakterien der Gattung *Clostridium* angreifen. „Diese Enzyme scheinen von einer gestreckten, unter Spannung stehenden Form, bei der je ein Paar von Endolysinen verknüpft ist, zu einem gelösten Zustand umzuschalten, in dem beide Endolysine Seite an Seite liegen“, erläutert EMBL-Forscher Matthew Dunne. „Das Umschalten von einem Zustand zum anderen setzt das Enzym frei, das dann beginnt, die bakterielle Zellwand abzubauen.“ Sobald die Zellwand anfängt zusammenzubrechen, kann die Bakterienzelle

dem inneren Druck nicht mehr standhalten, explodiert und setzt die neuen Bakteriophagen frei, die wiederum weitere Bakterienzellen infizieren. Gemeinsam mit Melinda Mayer und Arjan Narbad vom britischen Institut für Lebensmittelforschung in Norwich haben die Wissenschaftler zwei unterschiedliche Endolysine verglichen: eines von Bakteriophagen, die *Clostridium difficile* angreifen, und ein anderes, das die Zellwand von *Clostridia*-Keimen verdaut, die Probleme in der Käseproduktion verursachen. Mit Röntgenkristallographie und weiteren Techniken der Strukturbiologie konnten die Forscher an der EMBL-Messstation auf dem Hamburger DESY-Campus die dreidimensionale Struktur der Enzyme bestimmen und so auf ihre Funktionsweise schließen.

„Bemerkenswerterweise konnten wir beobachten, dass beide Endolysine einen gemeinsamen Aktivierungsmechanismus besitzen“, berichtet Dunne. Daraus folgern die Forscher, dass der Übergang vom gespannten zum gelösten Zustand wahrscheinlich eine häufige Taktik ist. Dieses Erkenntnis könnte möglicherweise dazu dienen, weitere Viren zu Verbündeten im Kampf gegen andere antibiotikaresistente Bakterien zu machen.

PLoS Pathogens, 2014; DOI: 10.1371/journal.ppat.1004228





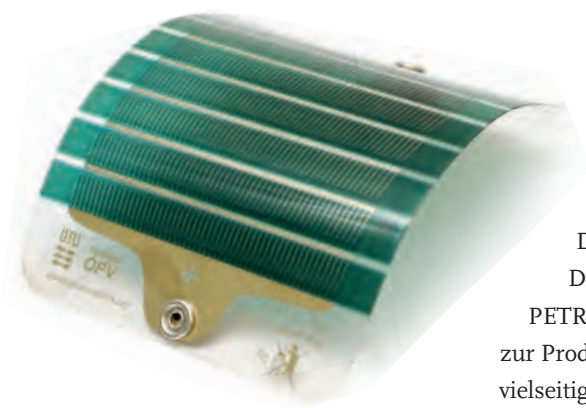
Bilder: Markus Häsel / DTU

Tandem-Solarzellen aus Kunststoff bieten viele Anwendungsmöglichkeiten.

# Flexibel, vielseitig, innovativ – die neue Solarzellengeneration

## Tandem-Solarzellen unter dem Röntgenmikroskop

Solarmodule als vielseitiger, gestalterischer Bestandteil von Hausfassaden, Autodächern oder Fenstern, flexibel formbar, leicht und preiswert – eine neue Generation von Solarzellen bietet Anwendungsmöglichkeiten weit jenseits der herkömmlichen Anlagen auf Dächern oder Feldern. Die Neuen bestehen aus Kunststoff und setzen auf organische Halbleiter. Noch dazu lassen sie sich in material- und energiesparenden Druckprozessen herstellen und eignen sich daher für eine kostengünstige Produktion. Um die organischen Solarzellen marktauglich zu machen, sind allerdings noch verschiedene Herausforderungen zu meistern. So gilt es, die Effizienz der Energieumwandlung zu verbessern sowie die Herstellungskosten zu senken und die Lebensdauer der Materialien und Module zu erhöhen.

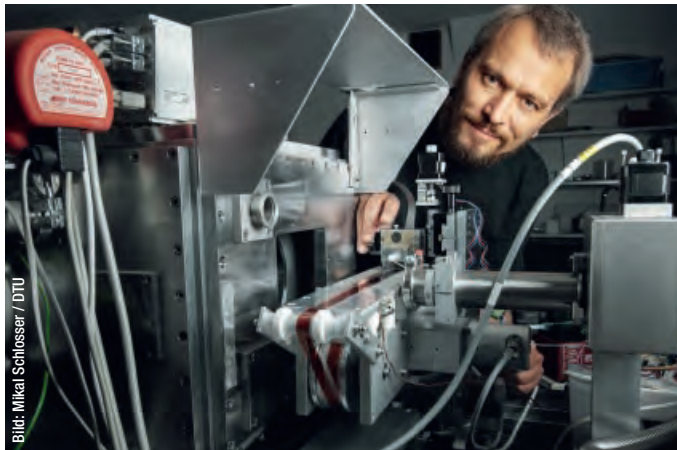


Der scharfe Röntgenblick von DESYs Forschungslichtquelle PETRA III ebnet einer neuen Methode zur Produktion günstiger, flexibler und vielseitiger Solarzellen den Weg in die Praxis. Das von dänischen Forschern entwickelte Verfahren ermöglicht die Produktion sogenannter Tandem-Kunststoffsolarzellen von vielen Metern Länge. Die Forscher benutzten ein Herstellungsverfahren, bei dem die verschiedenen Schichten einer Polymer-Solarzelle aus mehreren Lösungen auf einen flexiblen Trägerfilm aufgetragen werden. Auf diese Weise lässt sich die Kunststoff-Solarzelle schnell, günstig und nahezu in jeder gewünschten Länge produzieren.

Da der unbeschichtete Trägerfilm von einer Rolle ab- und mit der Beschichtung auf die nächste Rolle wieder aufgerollt wird, heißt dieses Verfahren Roll-to-roll-Prozess. Mehrere Kilometer lange Einzelsolarzellen sind auf diese Weise bereits produziert worden.

Allerdings ist die Energieausbeute dieser Art von Solarzellen nicht sehr hoch. Um die Effizienz zu steigern, hat das Forscherteam der Dänischen Technischen Universität (DTU) in Roskilde ein Verfahren erdacht, um eine zweite Polymer-Solarzelle auf die erste zu schichten, die für einen anderen Bereich des Sonnenspektrums empfindlich ist. Diese Tandem-Solarzelle wandelt entsprechend einen größeren Anteil des Sonnenlichts in elektrischen Strom um und erhöht so die Energieausbeute.

Die Multi-Beschichtung birgt allerdings neue Herausforderungen, wie Forschungsleiter Jens W. Andreasen erläutert: „Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass fertige Schichten durch das Lösungsmittel der folgenden Schicht wieder angelöst werden können, was zum kompletten Ausfall der Solarzelle führt.“



Jens Wenzel Andreasen an einem Experiment mit Polymer-Solarzellen

Um das Lösen der ersten Solarzelle zu verhindern, haben die Wissenschaftler eine Schutzschicht zwischen den beiden Solarzellen ihrer Tandem-Beschichtung eingefügt. Diese enthält unter anderem eine nur 40 Nanometer (millionstel Millimeter) dünne Schicht Zinkoxid – das ist rund tausendmal dünner als ein menschliches Haar.

### Die Solarzellenstruktur ist sehr filigran und besteht aus zwölf einzelnen Schichten. Die gesamte Struktur abzubilden, ist eine Herausforderung

Um die Form und Unversehrtheit der Schutzschicht und der übrigen Schichten der Tandem-Solarzelle zu überprüfen, nutzten die Forscher den scharfen Röntgenblick von PETRA III. „Die Solarzellenstruktur ist sehr filigran und besteht aus zwölf einzelnen Schichten. Die gesamte Struktur abzubilden, ist eine Herausforderung“, berichtet DESY-Forscherin Juliane Reinhardt, die an den Messungen beteiligt war. „Und die Probe war lediglich zwei mal vier Mikrometer groß.“ Ein Mikrometer ist ein tausendstel Millimeter.

Dennoch konnten die Forscher mit dem hellen Röntgenlicht und einer Technik namens 3D-Ptychographie in die Probe hineinschauen und dabei die feinen Details der filigranen

Schichtstruktur auflösen. Die Röntgen-Ptychographie rekonstruiert Form und chemischen Kontrast einer Probe aus der Art und Weise, wie sie das einfallende Röntgenlicht streut. Für eine komplette 3D-Rekonstruktion muss die Probe allerdings von allen Seiten und aus zahlreichen Winkeln aufgenommen werden. Der Vorteil der Ptychographie: Die Kombination der sich überlappenden Streubilder liefert eine höhere räumliche Auflösung, als es mit der konventionellen Röntgenabbildung physikalisch möglich wäre. Und anders als etwa ein hochauflösendes Elektronenmikroskop kann die Röntgen-Ptychographie dabei auch tief in die Probe hineinspähen.

„Mit Hilfe der 3D-Ptychographie konnten wir die komplette roll-to-roll-beschichtete 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. „Dies sind die 3D-Ptychographie-Messungen mit der höchsten räumlichen Auflösung, die uns bisher gelungen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die untere Solarzelle durch eine Zwischenschicht mit der richtigen Zusammensetzung vor der erneuten Lösung geschützt werden kann.“

Dieses Ergebnis ebnet den Weg zu einer möglichen industriellen Anwendung der Technik. „Ein komplexer Multilagen-Aufbau wie eine Polymer-Tandem-solarzelle kann auf verschiedene Weisen versagen“, erläutert Andreasen. „Mit Hilfe der 3D-Ptychographie konnten wir zeigen, dass der Aufbau der Substratelektrode die gute Leitfähigkeit der grob strukturierten Silberelektrode mit den guten filmbildenden Eigenschaften eines leitenden Polymers vereint, das in die Silberelektrode eindringt und eine glatte Oberfläche für die folgenden Schichten bildet.“ Das erlaubt das Auftragen sehr dünner Schichten mit sehr hoher Geschwindigkeit, wobei sich weiterhin zusammenhängende Lagen ohne Löcher bilden.

### Wir konnten jetzt belegen, dass wir lückenlose, homogene Schichten im Roll-to-roll-Verfahren aus Lösung herstellen können

Der Blick auf die gesamte Struktur kann darüber hinaus Informationen für eine mögliche Optimierung der Solarzelle oder des Produktionsverfahrens

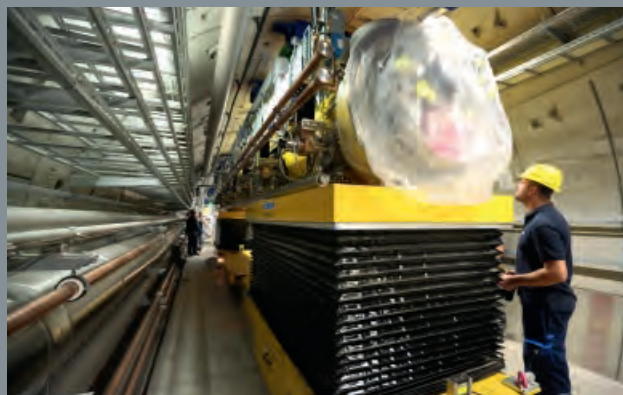


Ptychographische Phasen-  
kontrast-Projektion der Polymer-  
Tandemsolarzelle (zwei mal  
vier Mikrometer groß). Auf der  
Silberelektrode (breites rot-gelbes  
Band) liegt eine Schicht leitendes  
Polymer. Die beiden darüber liegen-  
den Solarzellen (hellblau) werden  
von einer dünnen Zinkoxid-haltigen  
Schicht (grün) getrennt. Oberhalb  
der zweiten Solarzelle ist die  
zweite Elektrode zu sehen (rot). Das  
Dreieck darüber ist der Rest einer  
Wolfram-Nadel, mit der die Probe  
unter dem Rasterelektronen-  
mikroskop präpariert wurde.

# FEMTOPOLIS

## Ein Maulwurf für Module

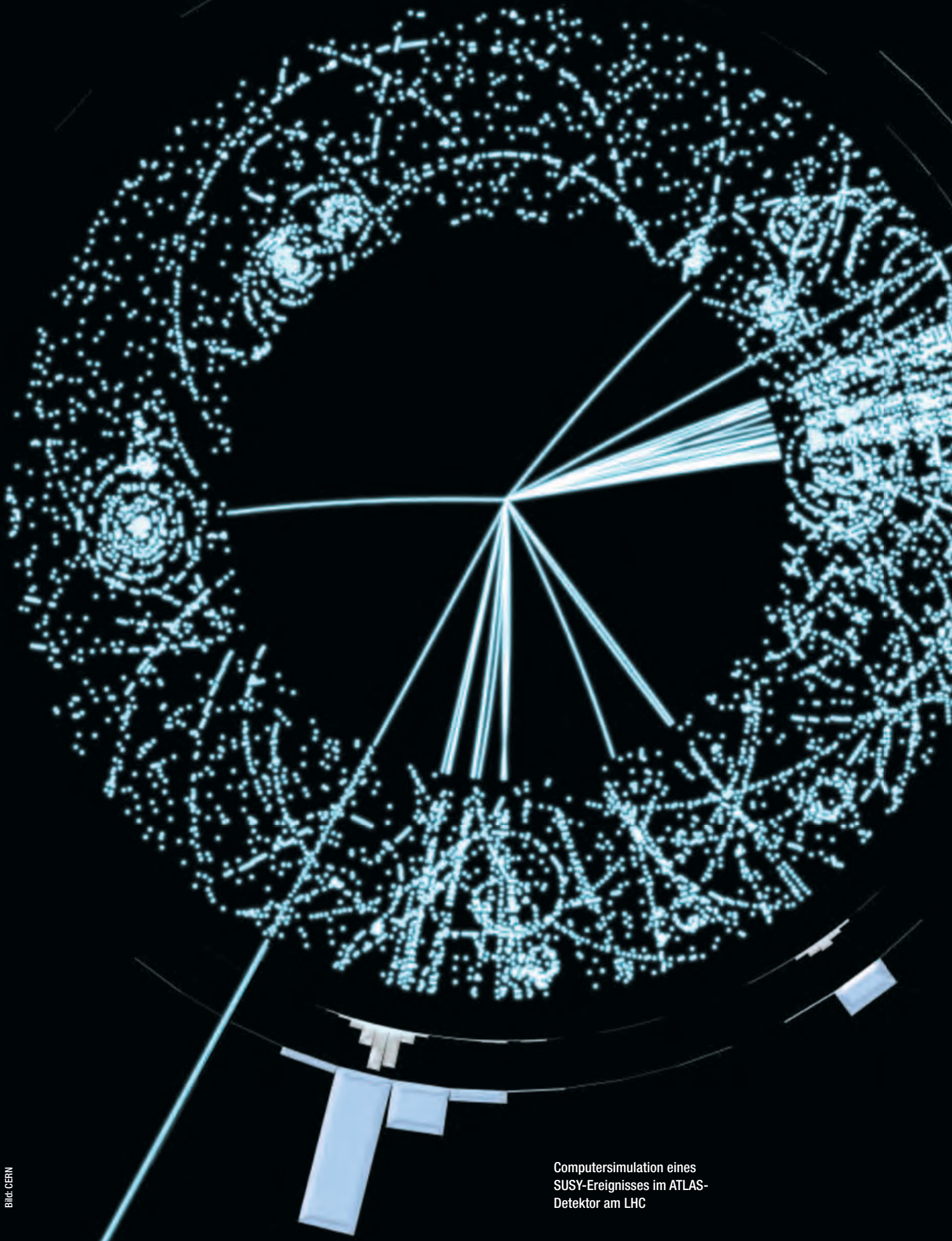
Sie nennen ihn liebevoll Mullewupp, angelehnt an das platt-  
deutsche Wort für Maulwurf, und nutzen ihn für fast alles, was es  
in dem unterirdischen Tunnelsystem des Röntgenlasers European  
XFEL zu transportieren gibt. Vor allem sind das insgesamt  
101 Module, aus denen der 1500 Meter lange Beschleuniger  
des Röntgenlasers derzeit zusammengesetzt wird. Zwölf Meter  
lang und acht Tonnen schwer ist so ein Modul, und es muss nicht  
nur in den Tunnel gefahren, sondern auch an die Tunneldecke  
gehievt und dort befestigt werden. Um das zu schaffen, ist  
der Mullewupp Transporter und Hubwagen zugleich und kann  
außerdem noch mit einem Zusatzkran bestückt werden. Er  
verfügt über vier Antriebsmotoren, Allradlenkung und bringt es  
auf zwei bis vier Kilometer pro Stunde. Schnell muss er auch  
nicht sein, dafür stark. Der rund 19 Meter lange Modultransporter,  
dessen große Batterie in einem eigenen Wagen gefahren wird,  
kann mit zwölf Tonnen Last beladen werden und diese fast  
zweieinhalb Meter über den Fußboden anheben. Auch Container  
lassen sich mit dem Mullewupp transportieren; außerdem ist  
das signalgelbe Gefährt ein echter Hingucker und ein Besucher-  
magnet am Tag der offenen Tür. Die Beschleunigerexperten  
von DESY sind daher zu Recht stolz auf ihren Maulwurf, der sich  
stets zuverlässig in seinem Tunnelsystem hin und her bewegt.



liefern. „Im Prinzip stellen wir die Elemente her,  
ohne die innere Struktur zu kennen. Aber mit  
Kenntnis der inneren Struktur wissen wir, welche  
Parameter wir modifizieren können und welche  
Faktoren wichtig sind für die Architektur des  
Elements, zum Beispiel die genaue Art der Substrat-  
elektrode und die Zusammensetzung der Zwischen-  
schicht“, betont Andreasen. „Wir konnten jetzt  
belegen, dass wir lückenlose, homogene Schichten  
im Roll-to-roll-Verfahren aus Lösung herstellen  
können, und zwar mit einer Geschwindigkeit von  
mehreren Metern pro Minute. Wir haben zum einen  
gezeigt, dass eine Herstellung von Tandem-Solar-  
zellen im Roll-to-roll-Verfahren möglich ist, wobei  
alle Schichten aus Lösungen aufgetragen werden,  
und zum anderen, dass dies nur mit einer speziellen  
Zusammensetzung der Schutzschicht zwischen  
den beiden Solarzellen möglich ist.“

Die in diesem Versuch produzierte Polymer-Tandem-  
solarzelle wandelt 2,7 Prozent des einfallenden  
Sonnenlichts in Strom um, was deutlich unterhalb  
des Wirkungsgrads konventioneller Solarzellen liegt.  
„Der Wirkungsgrad ist zwar sieben- bis achtmal  
niedriger als bei konventionellen Solarzellen, aber  
man sollte bedenken, dass die Produktionskosten  
bei diesem Typ Solarzellen mehrere Größenord-  
nungen unter denen für konventionelle Solarzellen  
liegen. Das ist der besondere Vorteil von Polymer-  
Solarzellen“, erläutert Andreasen. „Darüber hinaus  
ist dies die erste roll-to-roll-beschichtete Tandem-  
Solarzelle, deren kombinierter Wirkungsgrad  
tatsächlich über dem der beiden Einzelzellen liegt.“

Advanced Energy Materials, 2014; DOI: 10.1002/aenm.201400736



Computersimulation eines SUSY-Ereignisses im ATLAS-Detektor am LHC

Bild: CERN

SCHWERPUNKT

# ZEIG DICH!

Der weltgrößte Beschleuniger LHC macht sich auf die Suche nach SUSY-Teilchen, den Bausteinen für ein neues Weltbild

Diese Theorie hat es in sich: SUSY, die Supersymmetrie, stellt das Vorstellungsvermögen auf eine harte Probe. Doch die Mühe lohnt sich: Trotz des enormen Wissens, das Teilchenphysiker bereits über unsere Welt gesammelt haben, beschreibt ihr sogenanntes Standardmodell lediglich fünf Prozent des Universums. Eine Erweiterung dieses äußerst erfolgreichen, aber begrenzten Weltbilds verspricht die Supersymmetrie, die den bisher bekannten Teilchen je einen hypothetischen Superpartner zur Seite stellt. Für die Teilchenphysik würde SUSY, die „große Verdopplerin“, auf einen Schlag eine ganze Reihe von Rätseln lösen. Grund genug also, den weltgrößten Teilchenbeschleuniger, den Large Hadron Collider LHC in Genf, fit zu machen für die Suche nach den neuen Teilchen. Nach der Entdeckung des nobelpreisgekrönten Higgs-Teilchens im Jahr 2012 nimmt die „Entdeckermaschine“ LHC nun mit deutlich höherer Energie die Spur der heiß gesuchten SUSY-Teilchen auf.

# Zu schön, um falsch zu sein

Was SUSY, die Supersymmetrie, für die Teilchentheoretiker so anziehend macht



„Die Theorie der Supersymmetrie ist so überzeugend, dass man sich wundern würde, wenn die Natur keinen Gebrauch von ihr machte.“

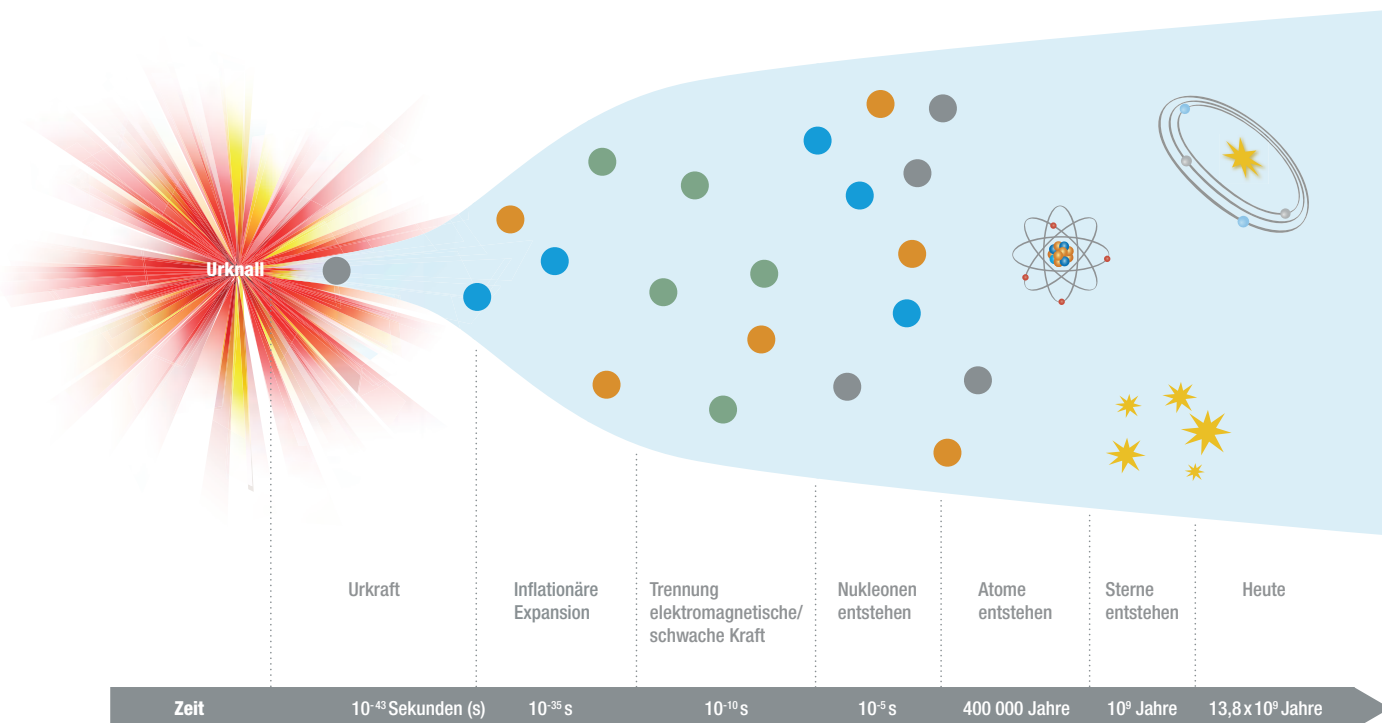
Georg Weiglein, DESY

Eine vollkommen symmetrische Welt? Für Physiker eine höchst verlockende Vorstellung. Schließlich haben sich Symmetrien in der Vergangenheit stets als zuverlässige Wegweiser erwiesen: Einsteins Relativitätstheorie basiert auf ihnen, ebenso das Standardmodell, so heißt das derzeit gültige Theoriegebäude der Teilchenforschung.

Deshalb schmieden die Gelehrten bereits seit den 1970er Jahren an einem neuen Weltbild – einer Theorie, die weit symmetrischer ist als alles zuvor. Noch ist diese Supersymmetrie, kurz SUSY, reine Hypothese. Doch wenn sie stimmt, wäre manches Rätsel der Physik auf einen Schlag gelöst. Gleichzeitig wären die Forscher ein gutes Stück weiter auf ihrem Weg zu einem einheitlichen, schlüssigen Weltmodell.

Im Alltag fallen Symmetrien vor allem in Bildern und Formen ins Auge: Unser Spiegelbild ist symmetrisch, ebenso die Muster auf Schmetterlingsflügeln oder die kunstvoll angelegten Gärten des Barock. In der Physik dagegen manifestieren sich Symmetrien vor allem in Formeln und Gleichungen. „Ein Ball sieht von allen Seiten gleich aus, egal wie man ihn dreht“, erläutert Herbert Dreiner, Physiker an der Universität Bonn. „Mathematisch entspricht das einer Rotationssymmetrie.“

Abstrakte Symmetrien wie diese haben sich in der Geschichte der Physik als höchst grundlegend erwiesen, sie bilden das Fundament für das Verständnis unserer materiellen Welt. Eindrucksvoll zeigt sich das in dem wohl prominentesten Regelwerk der Wissenschaft – in Einsteins Relativitätstheorie. „Sie ist ein Grundpfeiler der Physik und basiert auf Symmetrien, die Raum und Zeit miteinander verknüpfen“, sagt Georg Weiglein, Theoretiker bei DESY.



**Kurze Geschichte des Kosmos:** Mit dem Urknall vor rund 13,8 Milliarden Jahren entstanden unzählige Elementarteilchen, die sich dann zu Atomen und später zu Sternen und Galaxien zusammenfanden. Beim Urknall könnten sich auch SUSY-Teilchen gebildet haben, die bis heute als Dunkle Materie durchs Weltall geistern.

Einsteins gedankliches Meisterwerk basiert auf dem Grundsatz, dass die Gesetze der Physik immer und überall identisch sind: Das Licht bewegt sich stets gleich schnell – ob in Berlin oder auf dem Mond, ob in der vergangenen Woche oder in hundert Jahren. Mathematisch gesehen sind Einsteins Formeln, inklusive des berühmten  $E=mc^2$ , hochsymmetrisch. Die Experten sprechen bei dieser Raum-Zeit-Symmetrie von einer äußeren Symmetrie.

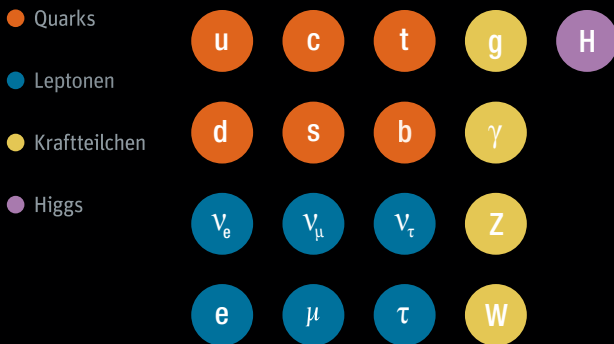
Als die Fachleute im Laufe der Zeit immer tiefer in den Mikrokosmos eindringen und die Quantenwelt der Atome und subatomaren Teilchen erkundeten, stießen sie auf eine weitere Klasse, die inneren Symmetrien. Diese abstrakten Konstrukte stecken hinter jenen Naturkräften, die das Geschehen im Mikrokosmos beherrschen. Ein Beispiel ist die elektromagnetische Kraft, die zwischen Elektronen und Atomkernen herrscht und sämtliche Prozesse in der Chemie bestimmt.

Direkte Folge dieser inneren Symmetrien sind die sogenannten Erhaltungssätze; für die Teilchenforschung sind sie ebenso wichtig wie praktisch: Prallt in einem Beschleuniger ein schnelles Elektron

frontal auf ein Anti-Elektron, ein Positron, werden kurzzeitig neue, exotische Teilchen gebildet, die umgehend wieder zerfallen. Während des gesamten Prozesses bleibt die elektrische Gesamtladung stets erhalten: Die Ladungen von Elektron und Positron addieren sich zu null, also ist auch die Summe der Ladungen der neu entstandenen Exoten gleich null und ebenso die Summe der Ladungen sämtlicher Zerfallsprodukte.

Nur: Die derzeit gültige Theorie der Teilchenforschung, das Standardmodell, behandelt innere und äußere Symmetrien weitgehend unabhängig voneinander – aus Sicht der Forscher ein unbefriedigender Zustand. „Deshalb tauchte schon vor Jahrzehnten die Frage auf, ob es nicht einen Zusammenhang zwischen beiden gibt“, sagt Georg Weiglein. „Die Antwort darauf ist die Supersymmetrie. In unserer vierdimensionalen Raumzeit ist sie die einzige mathematische Möglichkeit, innere und äußere Symmetrien unter einen Hut zu bekommen.“

Seit den 1970er Jahren tüfteln die Experten an dem entsprechenden theoretischen Rahmen. Bis heute haben sie eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten



### Teilchen und Kräfte

Das Standardmodell der Teilchenphysik fasst unser heutiges Verständnis vom Mikrokosmos zusammen. Es beschreibt die Grundbausteine der uns umgebenden Welt: Aus den Up- und Down-Quarks setzen sich Protonen und Neutronen zusammen, die Bestandteile der Atomkerne.

Die ebenfalls elementaren Elektronen bilden die Hülle der Atome. Sowohl Elektronen als auch Quarks besitzen schwere, instabile Bruderteilchen. Diese entstehen unter anderem beim Aufprall von kosmischer Strahlung auf die Erdatmosphäre und zerfallen rasch in stabile Teilchen. Hinzu kommen die Neutrinos – extrem leichte und flüchtige Teilchen, die zum Beispiel bei der Kernfusion in Sternen entstehen, in Ummengen durchs All rasen und dabei so gut wie gar nicht mit Materie interagieren. Außerdem beschreibt das Standardmodell Kraftteilchen: Sie vermitteln die Naturkräfte, die zwischen den Materieteilchen wirken. Mit dem 2012 entdeckten Higgs-Teilchen ist das Modell komplett. Das Higgs verhilft anderen Elementarteilchen zu ihrer Masse.

Das Standardmodell wurde bis heute eindrucksvoll bestätigt. Dennoch lässt es manche zentrale Frage der Physik offen:

*Gibt es einen tieferen mathematischen Zusammenhang zwischen Materiebausteinen und Kraftteilchen?*

*Woraus besteht jene Dunkle Materie, die offenbar die Galaxien im Weltall zusammenhält?*

*Warum ist das Higgs-Teilchen so erstaunlich leicht?*

*Sind die verschiedenen Naturkräfte in Wirklichkeit nur Facetten einer einzigen Urkraft?*

All diese Fragen könnte eine bislang hypothetische Theorie beantworten – SUSY, die Supersymmetrie.

entwickelt. Der grundlegende Mechanismus, der hinter all diesen SUSY-Spielformen steckt, ist allerdings hochabstrakt und wenig anschaulich. Er hat mit einer bestimmten Quanteneigenschaft der Elementarteilchen zu tun – dem Spin. Bildlich gesprochen entspricht der Spin dem Eigendrehmoment eines Teilchens. Die Physiker unterscheiden dabei zwei Gattungen: Teilchen mit Spin  $1/2$  heißen Fermionen und sind die Bausteine aller Materie. Teilchen mit Spin 1 dagegen werden Bosonen genannt und sind für die Übertragung jener Naturkräfte verantwortlich, welche die Materie zusammenhalten. Vereinfacht gesagt: Fermionen sind Materieteilchen, Bosonen sind Kraftteilchen.

Bei der Supersymmetrie bezieht man diesen Spin in die gewöhnliche Raumzeit mit ein – und landet in einer deutlich komplexeren und abstrakteren Raumzeit. Jedes Teilchen, das sich durch diesen erdachten Superraum bewegt, erhält ganz neue Eigenschaften – eine Vorstellung, die deutlich über das bewährte Standardmodell der Teilchenphysik hinausgeht.

Insbesondere müssten die gewöhnlichen Teilchen in diesem Superraum neue, exotische Partnerteilchen besitzen. Ein Quark etwa, von Natur aus ein Fermion, hätte ein Squark zum Partner, ein supersymmetrisches Quark aus dem Reich der Bosonen. Entsprechend wäre das Selepton das Pendant zum Elektron. Umgekehrt wird das Photon zum Photino, das Gluon zum Gluino. Erstere zählen zu den Bosonen, letztere zu den Fermionen. Insgesamt wäre der Teilchenzoo des Standardmodells glatt verdoppelt – um ein regelrechtes Schattenreich aus bislang hypothetischen Superpartnern. Diese allerdings müssen deutlich schwerer sein als die gewöhnlichen Teilchen, sonst hätte man sie in Beschleunigerexperimenten längst aufgespürt.



**„SUSY legt nahe, dass die verschiedenen Naturkräfte, die wir heute beobachten, von einer einzigen Urkraft herrühren.“**

Herbert Dreiner, Universität Bonn

Doch was wäre mit SUSY gewonnen, welche Fortschritte brächte sie der Teilchenforschung? Zunächst einmal, so die Intention ihrer Erfinder, wäre die Beschreibung der Natur schöner und

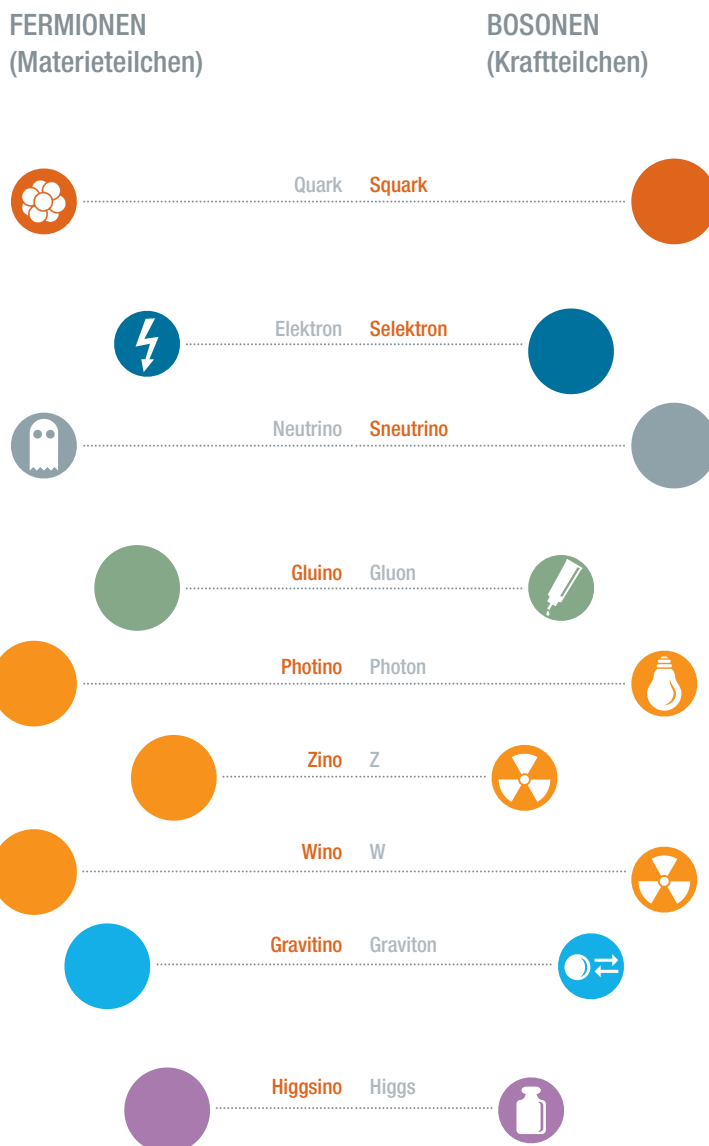


eleganter als jemals zuvor: Nicht mehr nur Raum und Zeit wären symmetrisch, sondern zusätzlich auch Kräfte und Materie – mathematisch gesehen ein hochsymmetrischer Zustand.

Im Laufe der Zeit aber stellte sich heraus, dass SUSY weit mehr hergibt: „Im Standardmodell sind die drei Grundkräfte der Teilchenphysik unterschiedlich stark“, sagt Herbert Dreiner. „Die Supersymmetrie legt nahe, dass sie kurz nach dem Urknall gleich stark gewesen sind, also aus einer einzigen Urkraft hervorgegangen sind.“ Damit könnte die Supersymmetrie einen Meilenstein für ein zentrales Ziel der Physik darstellen – die Vereinheitlichung der Grundkräfte. Als Kandidat für ein solch allumfassendes Weltenmodell gilt die Stringtheorie. Da sie die Supersymmetrie auf elegante Weise mit einbeziehen kann, spricht man heute meist von den „Superstrings“.

Außerdem besitzt SUSY das Potenzial, zwei konkrete Probleme der Teilchenforschung zu lösen. 2012 wurde am CERN in Genf ein neues Teilchen entdeckt, das mit dem letzten noch fehlenden Baustein im Standardmodell übereinzustimmen scheint. Dieses Higgs-Boson versetzt andere Elementarteilchen in die Lage, überhaupt zu ihrer Masse zu kommen. Doch trotz seiner Entdeckung ist das Higgs noch rästelhaft: „Laut Standardmodell müsste es sehr viel schwerer sein, als es tatsächlich ist“, erläutert Dreiner. „Erst die Supersymmetrie kann schlüssig erklären, warum das Higgs so leicht ist.“ Für das Universum hätte ein extrem schwergewichtiges Standard-Modell-Higgs dramatische Folgen gehabt: Der Kosmos hätte sich gar nicht in seine heutige Form entwickeln können.

Das zweite Geheimnis, das SUSY lüften könnte, ist das der Dunklen Materie. Rein rechnerisch dürfte sie im Kosmos rund fünfmal häufiger sein als gewöhnliche Materie. Doch woraus die Dunkle Materie besteht, ist nach wie vor ein Rätsel. Die Supersymmetrie verspricht eine Antwort: „Beim leichtesten SUSY-Teilchen könnte es sich um ein Neutralino handeln, ein stabiles Teilchen, das nicht weiter zerfällt“, sagt DESY-Forscher Georg Weiglein. „Damit wäre es ein guter Kandidat für die Dunkle Materie.“



**Schweres Schattenreich:** In der Supersymmetrie besitzt jedes bekannte Teilchen ein schweres Pendant. Die Superpartner unserer Materieteilchen zählen zu den Kraftteilchen, ihnen wird ein „S“ vorangestellt – das Quark wird zum Squark. Die SUSY-Partner unserer Kraftteilchen dagegen gehören zur Kategorie der Materieteilchen. Ihnen wird ein „ino“ angehängt – das Gegenstück zum Photon ist das Photino.

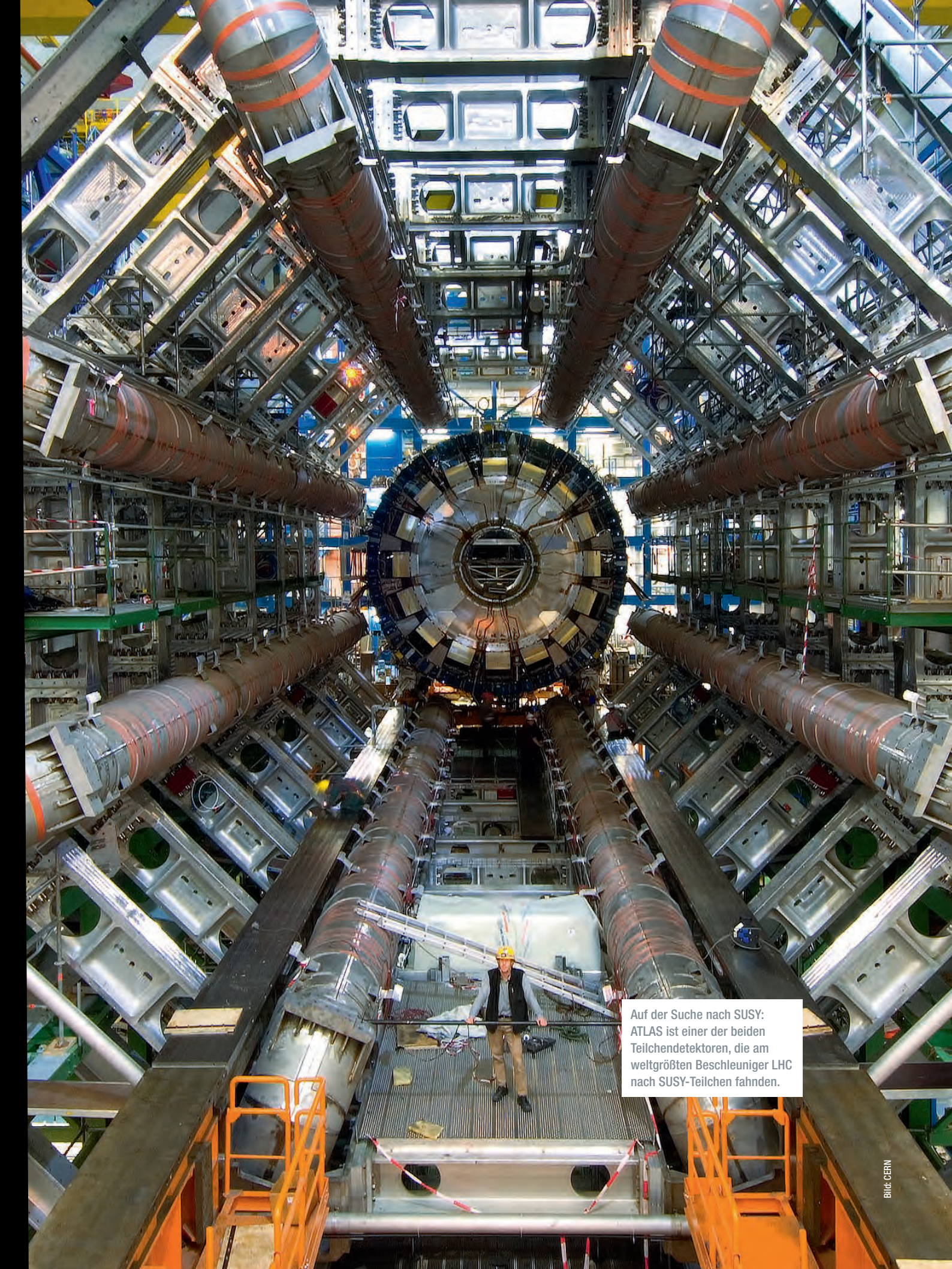
Sollte die Theorie der Supersymmetrie stimmen, würde man also deutlich klarer sehen in der Teilchenphysik: Die Physiker wüssten, wie Kräfte und Teilchen mathematisch zusammenhängen und warum das Higgs-Teilchen so leicht ist. Womöglich könnten sie das Geheimnis der Dunklen Materie lüften und einen Weg zur Vereinheitlichung der Naturkräfte entdecken. Doch um die Theorie zu beweisen, wäre eines zwingend nötig – endlich per Beschleuniger ein SUSY-Teilchen aufzuspüren.

Das Problem: „Leider verrät uns die Theorie nicht, wie schwer diese neuen Teilchen sind“, bedauert Georg Weiglein. Damit ist auch unklar, welche Energien man für ihre Erzeugung braucht, wie stark also jener Beschleuniger sein muss, der SUSY endlich dingfest macht. Die nächste Chance bietet sich am weltstärksten Beschleuniger LHC, der nach einer Umbauphase die Teilchen mit bis dato unerreichter Energie aufeinander feuert. „Ich bin zuversichtlich, dass man dann die entscheidenden Hinweise findet“, erklärt Weiglein. „Denn wie manche Kollegen sagen: Die Supersymmetrie ist einfach zu schön, um falsch zu sein!“



### Superstrings

Woraus besteht Materie im Kleinsten? Sind es tatsächlich jene Quarks und Elektronen aus dem Standardmodell? Nein, meinen die Vertreter der Stringtheorie. Ihnen zufolge ist die Welt aus unmessbar kleinen Fädchen aufgebaut, den Strings. Ähnlich wie eine Geigensaiten können diese auf unterschiedliche Weise schwingen und dadurch die bekannten Teilchen aufbauen. Der Charme dieser Idee: Die Strings versprechen, endlich die beiden Grundpfeiler der modernen Physik unter einem Dach zu vereinen – die Quantenmechanik und die Allgemeine Relativitätstheorie. Damit könnten die Strings in die legendäre Weltformel münden: jene allumfassende Theorie der Physik, an der schon Albert Einstein und Werner Heisenberg tüftelten. Schon bald nach der „Erfindung“ der Strings bemerkten ihre Schöpfer, dass der theoretische Rahmen der Supersymmetrie hervorragend in ihr Konzept passt – aus den Strings wurden die Superstrings. Würde man tatsächlich die ersten SUSY-Teilchen aufspüren, wäre das auch für die Strings-Befürworter eine frohe Botschaft: Sie würden sich bestätigt fühlen, mit ihrer Theorie auf der richtigen Fährte zu sein.



Auf der Suche nach SUSY:  
ATLAS ist einer der beiden  
Teilchendetektoren, die am  
weltgrößten Beschleuniger LHC  
nach SUSY-Teilchen fahnden.

# Die SUSY-Suche

## Wie Physiker mit dem weltgrößten Beschleuniger nach der Supersymmetrie fahnden

Der Fahrstuhl fährt 80 Meter in die Tiefe, dann öffnet sich die Tür. Zu Fuß geht es weiter durch Gänge und Räume aus schmucklosem Beton – bis man unvermittelt vor einem gewaltigen Hightech-Klotz steht. Sein Name: ATLAS, seine Eckdaten: 25 Meter hoch, 45 Meter lang, 7000 Tonnen schwer, zusammengesetzt aus Millionen von Einzelkomponenten. ATLAS ist einer der beiden Teilchendetektoren, die am weltgrößten Beschleuniger LHC nach SUSY-Teilchen fahnden.



**Isabell Melzer-Pellmann leitet die CMS-SUSY-Gruppe bei DESY. Sie ist zuversichtlich, dass der LHC supersymmetrische Teilchen entdecken wird.**

Zwischen 2010 und 2012 hatten ATLAS und CMS, so der Name des zweiten Detektors, die Suche begonnen – damals ohne Erfolg. Doch nach zweijährigem Umbau setzt der LHC die Suche 2015 bei nahezu doppelter Energie fort. „Damit steigt die Wahrscheinlichkeit deutlich an, supersymmetrische Teilchen zu erzeugen“, sagt Isabell Melzer-Pellmann, Leiterin der CMS-SUSY-Gruppe bei DESY. „Und ich bin zuversichtlich, dass wir sie endlich entdecken werden.“

Der Large Hadron Collider LHC am CERN ist der größte Beschleuniger der Welt – ein unterirdischer Ring mit einem Umfang von 27 Kilometern. Er beschleunigt Protonen (Wasserstoffkerne) auf enorme Energien und lässt sie frontal zusammenprallen. Dabei können exotische, kurzlebige Teilchen entstehen, die jedoch umgehend wieder in andere Teilchen zerplatzen. Diese in alle Richtungen davonfliegenden Bruchstücke versuchen die Detektoren möglichst präzise zu vermessen – von der Flugbahn über Impuls und Energie bis hin zur elektrischen Ladung. Auf Basis dieser Messdaten lässt sich später rekonstruieren, welche Elementarteilchen bei den Kollisionen entstanden und ob neue, bislang unentdeckte Exoten darunter waren.

Mit dieser Methode haben ATLAS und CMS 2012 das Higgs-Boson aufgespürt – den letzten noch fehlenden Baustein im Standardmodell der Teilchenphysik. Das Higgs-Boson hilft anderen Elementarteilchen dabei, zu ihrer Masse zu kommen. Schon ein Jahr später erhielten Peter Higgs und François Englert, zwei der Schöpfer des „Brout-Englert-Higgs“-Mechanismus, den Nobelpreis für Physik. Damit hatte der LHC eines seiner Ziele erreicht. Ein anderes – die Entdeckung supersymmetrischer Teilchen – steht noch aus.

Die Suche ist schwierig und aufwendig, denn die Experimente überfluten die Forscher mit regelrechten Datenlawinen. „Man kann unseren Detektor mit einer ultraschnellen Digitalkamera vergleichen, die 20 Millionen Aufnahmen pro Sekunde macht“, erläutert der Bonner Teilchenphysiker Philip Bechtel, einer der rund 3000 Physiker, die bei ATLAS mitmachen. „Wollten wir sämtliche Signale aufnehmen, müssten wir jede

Sekunde ein Petabyte speichern.“ Das entspräche 200 000 DVDs pro Sekunde.

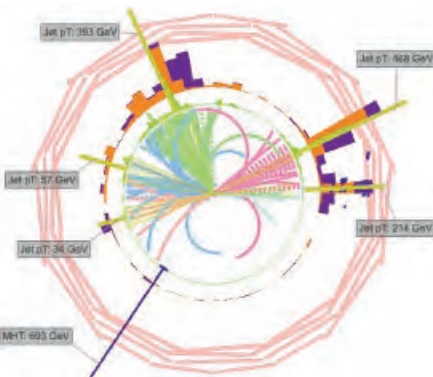
Technisch ist das unmöglich, weshalb eine clevere Elektronik jene Messungen aussortiert, die wahrscheinlich keine neuen Erkenntnisse enthalten, sondern nur Altbekanntes. Dennoch bleiben beachtliche Datenmengen übrig: Pro Sekunde werden etwa 200 Ereignisse gespeichert – mit einem Datenvolumen von zusammen einem Gigabyte. Pro Tag macht das einen Speicherbedarf von nahezu hundert Festplatten.

Aus diesem Wust müssen die Physiker einige wenige interessante Teilchenspuren herausfischen, die auf das kurzzeitige Entstehen und Vergehen eines SUSY-Teilchens hindeuten. „Auf ein interessantes Ereignis kommen eine Milliarde uninteressante“, erläutert Melzer-Pellmann. Konkret fahnden die Forscher nach speziellen Mustern im Detektor, durch die sich die supersymmetrischen Teilchen verraten könnten.

Ein Beispiel: Ein im LHC erzeugter SUSY-Exot könnte über eine Zerfallskette in das leichteste SUSY-Teilchen zerplatzen. In vielen SUSY-Modellen wäre dies das Neutralino, ein guter Kandidat für die Dunkle Materie im Universum. „Dieses Neutralino wäre zwar stabil, würde unserem Detektor aber durch die Lappen gehen, da es kaum mit Materie interagiert“, erklärt Melzer-Pellmann. „Aber wir würden merken, dass plötzlich Energie fehlt.“ Diese fehlende Energie wäre ein starker Hinweis für die Existenz des neuen Teilchens.

Um dieses mögliche Schlüsselereignis zu veranschaulichen, zeigt die DESY-Physikerin ein Bild auf ihrem PC: Zu sehen ist ein Schema von CMS,

durchsetzt von farbigen Linien, die die Teilchenspuren symbolisieren – die Momentaufnahme einer Kollision. „Nach oben fliegen viele Bruchstücke weg, unten dagegen wird kaum etwas registriert“, beschreibt sie. „Da könnte ein Neutralino hingeflogen sein, also ein SUSY-Teilchen, das nicht mit unserem Detektor interagiert.“



Teilchenspuren nach einer Kollision

Soweit die Theorie – doch in der Praxis ist es knifflig, solche eindeutigen Muster in den Messdaten zu erkennen. Der Grund: Andere, auf bekannte Teilchen zurückgehende Ereignisse sehen ganz ähnlich aus und täuschen dadurch ein SUSY-Signal vor. Nur mit raffinierten Analyseverfahren sowie der Auswertung extrem vieler Daten könnte es gelingen, die Handschrift von SUSY aus dem riesigen Untergrund-Kauderwelsch herauszulesen.

Bislang jedenfalls – in der ersten LHC-Betriebsphase von 2010 bis 2012 – blieb die Jagd erfolglos. „Wir haben nicht das geringste Indiz auf die Supersymmetrie gefunden“, bedauert Klaus Mönig, Co-Leiter der ATLAS-Gruppe bei DESY. „Das ist schon enttäuschend, denn die Voraussagen der Theoretiker hatten durchaus nahegelegt, dass wir etwas entdecken könnten.“

Damit scheinen bestimmte Varianten von SUSY bereits ausgeschlossen. Denn die Supersymmetrie ist kein kompaktes, geschlossenes Modell, sondern entspricht eher einem theoretischen Rahmen von gewisser Flexibilität. Innerhalb dieses Rahmens haben die Theoretiker mit den Jahren eine Vielzahl unterschiedlicher SUSY-Varianten entwickelt. Manche davon sind – relativ gesehen – einfacher, andere dagegen komplexer.

Die einfachen Theorien waren davon ausgegangen, dass die SUSY-Teilchen relativ leicht sind. Dann aber hätte sie der LHC bereits entdecken müssen. „Ganz so einfach scheint es uns die Natur nicht zu machen“, meint der Theoretiker Herbert Dreiner aus Bonn. „Aber noch ist die Supersymmetrie nicht gescheitert, vielleicht sind ja die komplexeren Varianten richtig, in denen auch schwerere Teilchen möglich sind.“



**Klaus Mönig leitet die ATLAS-Gruppe am DESY-Standort in Zeuthen und hat schon in der ersten LHC-Betriebsphase nach Indizien für die Supersymmetrie gefahndet.**

Nach diesen schwereren SUSY-Teilchen hält der LHC in seiner zweiten Betriebsphase Ausschau. Im September 2008, wenige Tage nach seinem Erststart, war ein Kabel durchgebrannt, wodurch ultrakaltes Helium explosionsartig verdampfte und mehrere Beschleunigermagneten aus ihrer Verankerung riss.

Nach der Reparatur hatten die CERN-Verantwortlichen den LHC vorsichtshalber nur mit halber Kraft laufen lassen – bei einer Energie von zunächst 7, später 8 Teraelektronenvolt (TeV). Ab 2013 wurde der Ring dann umgebaut, so dass er nun eine deutlich höhere Kollisionsenergie erreichen soll – 13 TeV.

### Es gibt gute Argumente, dass wir die Supersymmetrie in den kommenden Jahren finden, aber keine Gewissheit

Das Entscheidende: Je höher die Energie, mit der die Maschine ihre Protonen aufeinander feuert, umso schwerer die Teilchen, die sich dadurch erzeugen lassen. „Dadurch erschließt sich ein ganz neuer Bereich, deshalb setzen wir große Hoffnungen in die nächste Phase“, betont DESY-Theoretiker Georg Weiglein. „Es gibt gute Argumente, dass wir die Supersymmetrie in den kommenden Jahren finden, aber keine Gewissheit.“

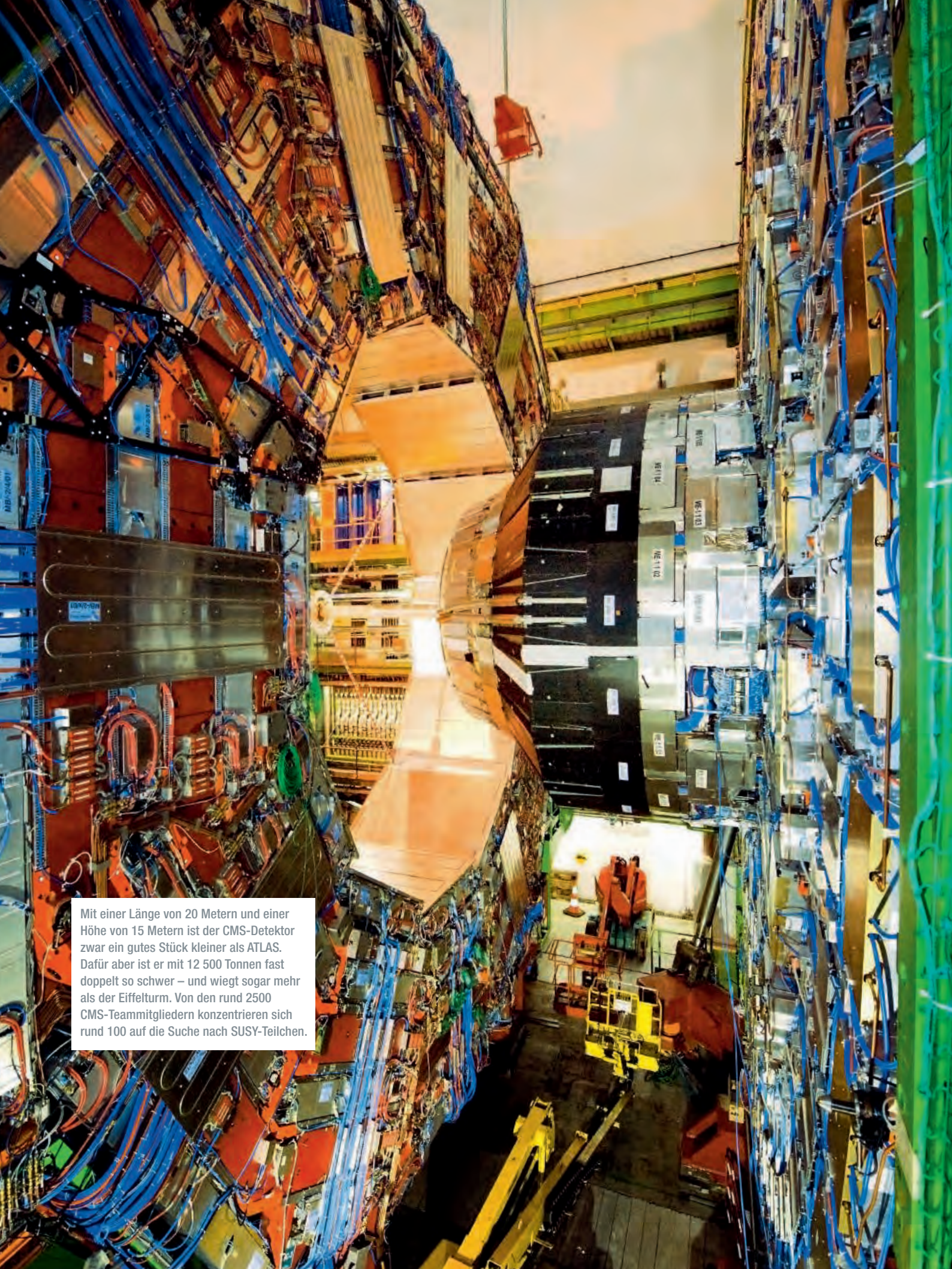
Was aber, wenn selbst der hochgerüstete Superbeschleuniger keinerlei Lebenszeichen von SUSY liefert? Das würde bei manchem Experten für Katerstimmung sorgen. „Dann ist die Sache für mich gegessen“, meint Herbert Dreiner. „In diesem Fall würde ich mich neuen Problemen zuwenden.“ Andere hingegen wollen unbeirrt weitersuchen – und befürworten einen nochmaligen Ausbau des LHC in zehn Jahren.

Danach soll die Maschine deutlich mehr Messdaten produzieren können – was die Wahrscheinlichkeit auf eine Entdeckung erhöhen dürfte.

Manche Physiker dagegen liebäugeln mit einer alternativen Beschleunigertechnik, bei der nicht Protonen, sondern die deutlich leichteren Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, aufeinander geschossen werden. „So eine Maschine würde zwar keine so hohen Energien wie der LHC erreichen“, sagt DESY-Physiker Karsten Büßer. „Aber dafür ließen sich die Kollisionen deutlich präziser analysieren.“ Damit könnte man dann – so die Hoffnung – eine bestimmte Gattung von SUSY-Ereignissen, die in der babylonischen Fülle der LHC-Daten schlicht untergehen würden, doch noch dingfest machen.

„Außerdem könnte ein Elektron-Positron-Beschleuniger das Higgs-Teilchen genau unter die Lupe nehmen“, erklärt Büßer. „Womöglich finden sich dabei Abweichungen vom Standardmodell, die am besten durch SUSY zu erklären wären.“ So wäre es im Prinzip möglich, dass 2012 am CERN gar nicht das Standardmodell-Higgs, sondern ein supersymmetrisches Higgs gefunden wurde.

Doch selbst wenn keines der Experimente irgendwelche Anzeichen von SUSY aufspürt – endgültig vom Tisch wäre die Theorie damit noch nicht. „Im Prinzip könnte es sein, dass supersymmetrische Teilchen so schwer sind, dass man sie nie finden können wird“, sagt Georg Weiglein. Dann bliebe SUSY auf ewig bloße Theorie – mathematisch wunderschön und elegant, aber praktisch ohne Belang.



Mit einer Länge von 20 Metern und einer Höhe von 15 Metern ist der CMS-Detektor zwar ein gutes Stück kleiner als ATLAS. Dafür aber ist er mit 12 500 Tonnen fast doppelt so schwer – und wiegt sogar mehr als der Eiffelturm. Von den rund 2500 CMS-Teammitgliedern konzentrieren sich rund 100 auf die Suche nach SUSY-Teilchen.

## Die Suche nach Indizien

Sollte es nicht gelingen, SUSY-Teilchen mit einem Beschleuniger zu finden, bliebe die Möglichkeit des Indizienbeweises. Das Kalkül: Sollte ein Experiment Ergebnisse liefern, die nicht mehr durch das Standardmodell, aber durch die Supersymmetrie erklärbar wären, wäre die Theorie deutlich gestärkt. Für solche indirekten Nachweise gibt es mehrere Ansätze:

### 1. Detektoren, die auf Dunkle Materie lauern

Derzeit versuchen mehrere Experimente auf der Welt, jene Teilchen aufzuspüren, die hinter der Dunklen Materie vermutet werden. Die meisten dieser Versuche stecken in Laboren tief in der Erde oder mitten im Berg, um sich gegen störende Einflüsse von außen abzuschirmen. Stößt ein Dunkle-Materie-Teilchen gegen das Kristallgitter des Detektors, sollte sich das durch ein schwaches Signal verraten. Noch läuft die Suche ohne Erfolg. Doch würde man solch einen Exoten tatsächlich aufspüren, könnte sich dahinter ein SUSY-Teilchen verbergen.

### 2. Magnetmoment unter der Lupe

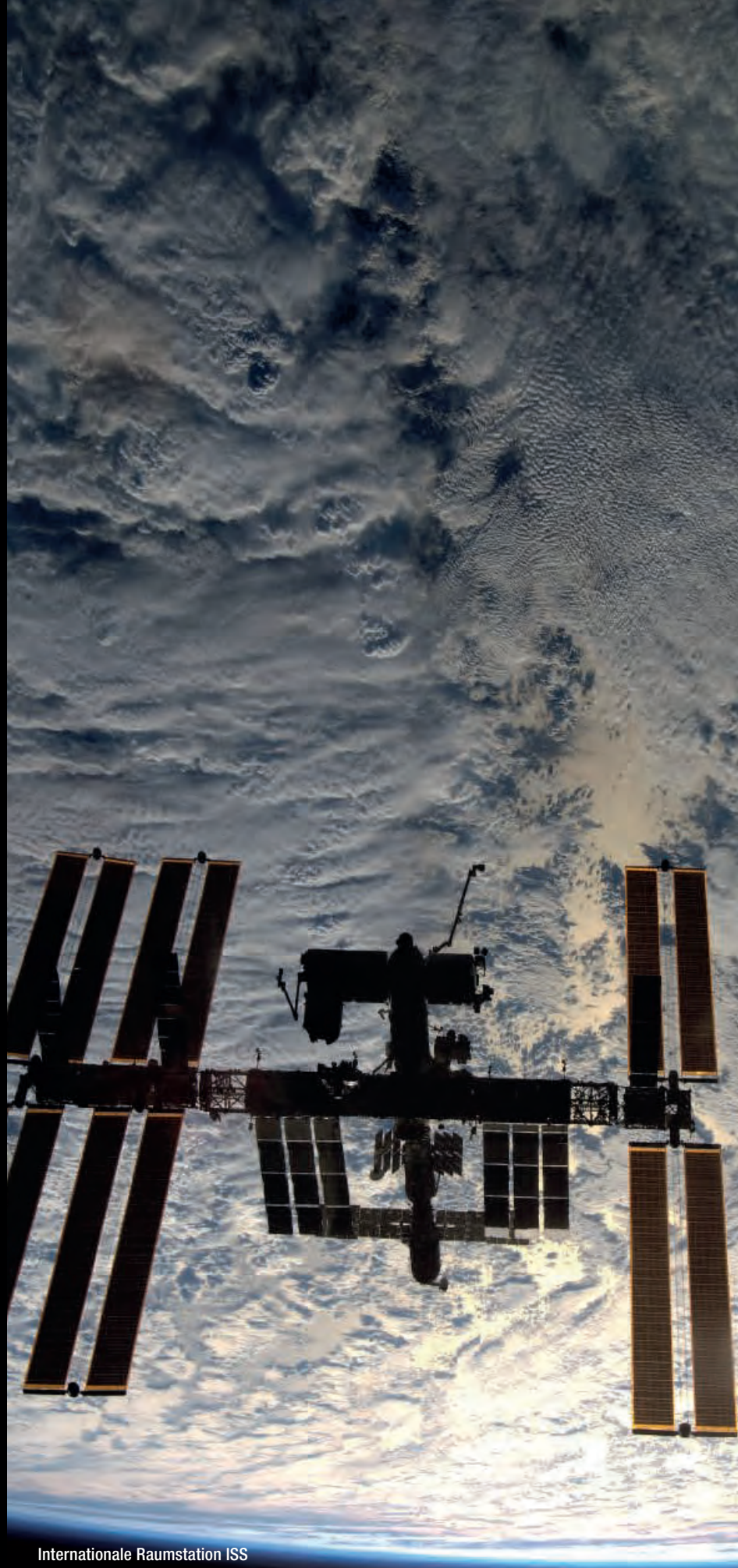
Als US-Forscher vor einigen Jahren das Myon – ein elektronenartiges Teilchen – präzise vermaßen, kamen sie zu einem verblüffenden Resultat: Das Magnetfeld des Winzlings wich ein wenig von jenem Wert ab, den das Standardmodell vorausgesagt hatte. Eine mögliche Erklärung: Das Myon könnte sich kurzzeitig in seinen Superpartner verwandelt haben, das Smyon. Restlos überzeugend sind die Messdaten jedoch noch nicht – weshalb Physiker in Chicago den Versuch ab 2016 mit größerer Präzision wiederholen wollen.

### 3. Spurensuche am Südpol

Tief im antarktischen Eispanzer stecken die rund 5000 Lichtsensoren des IceCube-Experiments. In erster Linie sollen sie die Signale von Neutrinos aufspüren – flüchtige Teilchen, die aus der Ferne des Weltalls kommen und mit Materie höchst selten interagieren. Doch vielleicht kann IceCube auch die Signale von SUSY-Teilchen beobachten. Diese müssten regelmäßig in der Erdatmosphäre erzeugt werden, wenn energiereiche kosmische Teilchen mit enormer Wucht auf die Lufthülle prallen. Manche dieser SUSY-Teilchen sollten in IceCube einschlagen und eine verräterische Leuchtspur hinterlassen.

### 4. Indizienjagd im Weltall

Seit 2011 ist an Bord der Internationalen Raumstation ein Teilchendetektor installiert: AMS zählt Antiteilchen und versucht herauszufinden, wie viel Antimaterie es im Weltall gibt. Die ersten Ergebnisse lieferten eine Überraschung: AMS hat mehr Positronen aufgeschnappt als erwartet. Vielleicht stammen sie von Pulsaren, von rasant rotierenden Neutronensternen. Es könnte aber auch sein, dass herumgeisternde Dunkle-Materie-Teilchen miteinander kollidieren und dabei die Positronen aussenden. Welche Annahme richtig ist, können erst künftige Messdaten entscheiden.



Internationale Raumstation ISS



# Physik jenseits des Standardmodells

CERN-Generaldirektor Rolf Heuer über das Potenzial des LHC, der mit deutlich höherer Energie nach neuen Teilchen sucht

femto Rolf Heuer, Sie sind seit dem Jahr 2009 Generaldirektor des CERN und haben damit die gesamte bisherige Betriebszeit des Large Hadron Collider LHC begleitet. Was waren damals die wissenschaftlichen Erwartungen?

Heuer Ich denke, fast jeder hatte gehofft, man findet am schnellsten Teilchen der Dunklen Materie, sprich Supersymmetrie. Das liegt daran, dass der Wirkungsquerschnitt, also die Erzeugungswahrscheinlichkeit, von Dunkler Materie relativ hoch und die Signatur relativ klar ist. Viele Leute haben gedacht, dass wir Supersymmetrie gleich morgen finden. Das war natürlich naiv, und die Natur hat sich auch anders entschieden: Die Supersymmetrie, wenn sie existiert, liegt woanders.

femto Stattdessen kam 2012 die sensationelle Entdeckung des Higgs-Teilchens. Und danach? Was sind die Erwartungen für die nächsten Jahre?

Heuer Die gleichen wie vor drei Jahren, sprich: Es müsste doch irgendwann einmal die Supersymmetrie oder irgendein anderer Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells kommen. Das Standardmodell kann ja nicht der Weisheit letzter Schluss sein. Ein Vergleich: In unserem täglichen Leben haben wir im Prinzip



Rolf Heuer, CERN-Generaldirektor

nur mit Newton zu tun und nicht mit Einstein. (Es sei denn, wir nutzen GPS – wenn man da Einstein vergisst, landet man in der Elbe und nicht am Fischmarkt.) Newton ist insofern eine Niedergeschwindigkeitsnäherung zu Einstein. So sehe ich auch das Standardmodell: als Niederenergienäherung zu etwas, das außen drumherum ist und dieses Standardmodell als Näherung beinhaltet. Dieses Größere müssen wir irgendwann mal finden. Das ist meine Hoffnung.

femto Und wann?

Heuer Dazu kann ich nichts sagen. Das ist erstens abhängig von der Masse der Teilchen, zweitens von der Kopplungsstärke, wie häufig sie also erzeugt werden, und wo die neue Skala liegt. Wenn die Skala sehr weit weg liegt, kann

es sein, das es nur ganz geringe Effekte gibt. Ganz wichtig sind in den nächsten Jahren sowohl die Energieerhöhung beim LHC als auch die Präzisionsmessungen, sprich: die hohe Statistik.

femto Wie muss man es sich konkret vorstellen, wenn es heißt: „Wir entdecken Supersymmetrie“ – was passiert da?

Heuer Wir finden neue Teilchen mit den Eigenschaften von supersymmetrischen Teilchen, sprich: mit den entsprechenden Zerfallsketten. In der Regel erzeugen wir nicht das Teilchen mit der geringsten Masse, sondern welche mit höherer Masse, die dann in das leichteste Teilchen zerfallen. Dieses leichteste Teilchen ist in vielen Theorien stabil, es agiert also mehr oder weniger wie ein Neutrino, indem es im Detektor nicht nachgewiesen werden kann, wir es also nicht sehen. Aber wir sehen natürlich die fehlende Energie, die dieses Teilchen mitnimmt, und den fehlenden Impuls. Und so können wir mit den Detektoren rekonstruieren, wie die Zerfallskette war, die wir dann mit der großen Matrix von supersymmetrischen Modellen abgleichen können. Und da gibt es dann eine Stelle, an der es passt.

femto Wie viele Teilchen brauchen wir, um sagen zu können, dass wir es sicher wissen?

Heuer Die Frage ist: Was ist sicher? Wie sicher ist man? Ich denke, wenn man ein Teilchen findet, das nicht ins Standardmodell passt, ist man sicher, dass es zur Physik außerhalb des Standardmodells gehört. Jedes fundamentale Teilchen, das neu dazukommt, ist jenseits des Standardmodells. Da bin ich absolut sicher. Ich bin nur nicht sicher, was es dann genau ist. Aber ich weiß: Jetzt habe ich ein Loch im Standardmodell gefunden.

femto Und was ist, wenn da nichts ist?

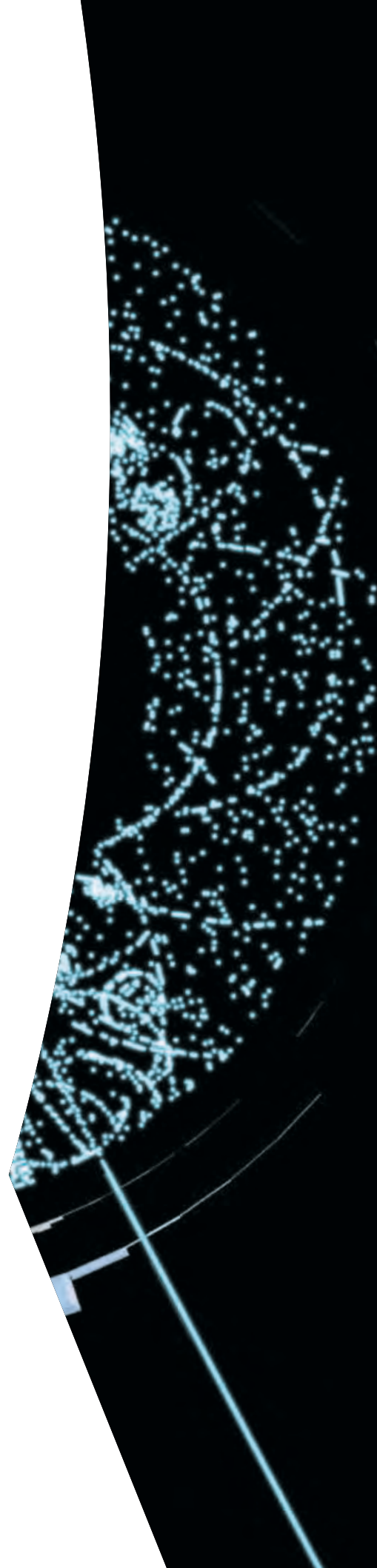
Heuer Dann messen wir einfach weiter, bis wir etwas finden. Wenn wir in den nächsten Jahren überhaupt nichts finden, haben wir zumindest eine Idee, wie weit entfernt die Skala ist, die neue Physik beinhalten würde. Und dann ist die Frage, ob es andere Messungen gibt, die uns weiterführen können, also Hochpräzisionsmessungen, um einen Eindruck für die Abweichung vom Standardmodell zu kriegen. Gerade, wenn man erst einmal keine neuen Teilchen findet, ist Hochpräzision das A und O, und dafür brauchen wir verschiedene Methoden.

femto Wie geht es nach dem LHC und nach der nächsten Entdeckung weiter?

Heuer Das hängt von der Entdeckung ab. Im Moment halten wir uns am CERN alle Türen für zukünftige Beschleuniger offen: Proton-Proton, Elektron-Positron und Elektron-Proton, kreisförmig oder linear. Die nächsten Jahre müssen zeigen, mit Resultaten vom LHC, aus der Astroteilchenphysik und von anderen Maschinen, in welche Richtung es gehen soll.

femto In der Geschichte der Teilchenphysik hat eine Entdeckung meistens die nächste Frage gleich mit im Gepäck gehabt. Wird das hier auch so sein?

Heuer Was ist die nächste Frage? Eine Frage kennen wir natürlich schon – was ist die Dunkle Materie? Aber die nächste Frage ist: Bei welcher Energie können wir sie entschlüsseln? Dafür müssen wir ein Gespür bekommen. Wir können nicht einfach nur sagen, dass wir den nächsten Hochenergiebeschleuniger brauchen. Aber wenn wir ein gutes Projekt haben und gemeinsam hinter so einem Projekt stehen, bekommen wir auch die Realisierung hin.



# Die große Vereinheitlichung

Nicht weniger als alles möchte die Physik am liebsten erklären können. Mit einer eleganten Theorie, die ihr gesammeltes Wissen in einem Weltmodell vereint, das zurück bis zum Ursprung des Universums reicht und auch die große Frage beantwortet, ob die uns bekannten Naturkräfte lediglich verschiedene Ausprägungen einer gewaltigen „Urkraft“ sind. Eine Beschreibung, die es sogar endlich ermöglichen könnte, die Schwerkraft mit den übrigen Kräften unter einen Hut zu bringen.



Joachim Mnich, DESY-Teilchenphysikdirektor

„Aber ist die Natur wirklich so einfach, dass es am Ende nur eine Kraft gibt?“, fragt der DESY-Teilchenphysikdirektor Joachim Mnich. „Diese Frage werden wir nicht so bald beantworten können. Wir könnten jedoch in den kommenden Jahren Hinweise bekommen, in welcher Richtung die Suche nach einer Antwort lohnt.“ Mnich weiß aus jahrzehntelanger Erfahrung, dass es die vielen einzelnen Schritte sind, die den langen Weg zu einer solchen „Weltformel“ so spannend machen, und von denen jeder einzelne eine Herausforderung ist.

So ist das 2012 entdeckte Higgs-Teilchen nicht nur der krönende Abschluss des

überaus erfolgreichen Standardmodells der Teilchenphysik, sondern auch ein entscheidender Türöffner für neue Physik jenseits dieses Modells. „In den kommenden Jahren werden wir die Eigenschaften des Higgs-Teilchens so präzise wie möglich vermessen“, erklärt Mnich. „Wenn wir kleinste Abweichungen von den Vorhersagen erkennen, könnte genau darin ein entscheidender Hinweis auf bislang unbekannte Physik stecken, die unser Weltbild über die bisher bestätigten Modelle hinaus erweitern würde.“

Eine der ganz großen Fragen ist die nach der Natur der Dunklen Materie

Dabei könnten die heiß gesuchten supersymmetrischen Teilchen ans Licht kommen – oder etwas ganz anderes. „Eine der ganz großen Fragen ist die nach der Natur der Dunklen Materie“, erläutert Mnich. Denn das erfolgreiche Standardmodell der Teilchenphysik erklärt erst fünf Prozent des Universums. Das ist der Anteil, den die uns bekannte Materie stellt. Astronomische Beobachtungen haben eine weitere Materieform aufgespürt, die jedoch nicht sichtbar ist und sich bislang nur durch ihre Schwerkraft verrät. Diese Dunkle Materie ist über fünfmal häufiger als die uns gewohnte Materie, ihre Natur ist jedoch völlig rätselhaft. Viele Physiker hoffen, dass der Superbeschleuniger LHC Kandidaten für die Dunkle Materie aufspürt.

„Aber wir wissen noch nicht einmal, ob es sich bei der Dunklen Materie überhaupt um Teilchen handelt“, sagt Mnich. „Wir wissen, dass die Dunkle Materie über die Schwerkraft mit anderer Materie wechselwirkt. Wir hoffen, dass sie auch die schwache Wechselwirkung besitzt, die in der Natur unter anderem für radioaktive Zerfälle verantwortlich ist. Sonst wird es sehr schwer, Teilchen der Dunklen Materie in einem Beschleuniger zu finden.“ Tatsächlich kommen auch supersymmetrische Teilchen als Kandidaten für die Dunkle Materie in Frage.

Es ist eine spannende Herausforderung, immer wieder die Grenzen unserer Wahrnehmung und Vorstellungskraft zu erweitern

Doch selbst wenn die Physik einen Hinweis auf die Natur der Dunklen Materie finden sollte, lässt sich damit noch immer nicht der Kosmos erschöpfend erklären. Denn mehr als zwei Drittel des Inhalts unseres Universums stellt eine mysteriöse Dunkle Energie, die den Raum selbst auseinanderzutreiben scheint, wie astronomische Beobachtungen gezeigt haben. Den Forschern fehlt bislang jedes Indiz, worum es sich dabei handeln könnte.

Konkreter sieht die Fahndung nach den Ursachen der überraschenden Asymmetrie von Materie und Antimaterie aus. Im Urknall muss eigentlich ebenso viel Materie wie Antimaterie entstanden sein. Doch von der Antimaterie findet sich heute im Universum so gut wie keine Spur. „Viele Experimente weltweit suchen nach der Ursache für diese Asymmetrie“, erläutert Mnich. „DESY beteiligt sich zum Beispiel stark am Experiment Belle II in Japan.“ Der dortige Ringbeschleuniger KEKB wird zu einer „Fabrik“ für sogenannte B-Mesonen umgebaut, an denen sich die Asymmetrie besonders gut studieren lässt. Die Grundlagen für solche B-Fabriken wurden unter anderem bei DESY am DORIS-Speicherring gelegt, an dem Forscher 1987 mit Hilfe des ARGUS-

Detektors zum ersten Mal die Umwandlung eines B-Mesons in sein Antiteilchen, ein Anti-B-Meson, beobachteten.

„Die Experimente zur Antimaterie sind sehr spannend“, sagt Mnich. „Am CERN ist es beispielsweise gelungen, Antiwasserstoff herzustellen – also ein Antiproton, das von einem Positron umkreist wird. Damit zu experimentieren ist hochinteressant! Zum Beispiel hat noch niemand exakt gemessen, wie sich Antimaterie in der Schwerkraft verhält. Fällt Antiwasserstoff vielleicht nach oben? Es ist eine spannende Herausforderung, immer wieder die Grenzen unserer Wahrnehmung und Vorstellungskraft zu erweitern!“

Klar ist: Auch die nächsten Schritte zur „Weltformel“ sind eine globale Herausforderung. „In der Teilchenphysik hat internationale Zusammenarbeit eine lange Tradition“, sagt Mnich. „DESY arbeitet maßgeblich an verschiedenen Großprojekten mit, die nach SUSY-Teilchen und anderen Kandidaten für die Dunkle Materie fahnden. Ein wichtiger Schwerpunkt sind natürlich die Experimente am LHC, aber beispielsweise auch die Astroteilchenphysik.“

Eine besondere DESY-Stärke liegt nach wie vor in der Analyse der Protonstruktur, deren genaue Kenntnis für die weitere Higgs-Forschung am LHC von entscheidender Bedeutung ist. Denn in dem Beschleuniger stoßen Protonen auf Protonen und aus den Kollisionen ergibt sich erst dann ein klares Bild, wenn im Detail bekannt ist, was da eigentlich aufeinanderprallt. Nirgends ist das Innere des Protons genauer untersucht worden als am DESY-Beschleuniger HERA.

Doch experimentieren allein reicht nicht. „Wir müssen die Experimente auch verstehen“, betont Mnich. „Dafür ist die Theorie unverzichtbar. Wichtig ist dabei, die Resultate von Beschleunigerexperimenten und astronomischen Beobachtungen zusammenzuführen. Bei DESY haben wir eine außerordentlich starke Theoriegruppe von Weltruf, die übrigens auch ein einzigartiges Umfeld für Nachwuchswissenschaftler bietet.“

Und wie geht es weiter in den nächsten Jahren? „Wie die Welt der Teilchenphysik in fünf Jahren aussieht, ist heute schwer zu sagen“, erklärt Mnich, der auch neuer Vorsitzender des International Committee for Future Accelerators (ICFA) ist. „Das Potenzial des LHC mit fast verdoppelter Energie ist einzigartig. Aber um beispielsweise das Higgs wirklich zu verstehen, brauchen wir auch einen Elektron-Positron-Beschleuniger, eine Art Higgs-Fabrik, die umfangreiche Präzisionsmessungen erst möglich macht. DESY hat eine enorme Kompetenz in der beschleunigerbasierten Teilchenphysik und wird maßgeblich mit dabei sein. Ich bin gespannt!“

## Neues Gründerzentrum am DESY-Campus

### Senat, DESY und Universität schaffen gemeinsam Voraussetzungen für Existenzgründer

Künftig sollen auch junge innovative Unternehmen von der herausragenden wissenschaftlichen Expertise und Infrastruktur auf dem DESY-Campus in Hamburg profitieren. Ein neues Gründerzentrum wird dazu in unmittelbarer Campus-Nähe auf einem gut 5000 Quadratmeter großen Grundstück Büroräume, Labore und Beratung durch ein Start-up-Office bieten. Hamburgs Erster Bürgermeister Olaf Scholz erklärt: „Das Innovationszentrum ist ein weiterer Baustein unserer Strategie, den Campus Bahrenfeld gemeinsam mit vielen Beteiligten zu einem der weltweit führenden Standorte im Bereich der Strukturforschung auszubauen. Es dürfte derzeit national und international kaum andere Standorte geben, die eine vergleichbare Entwicklungsdynamik aufweisen.“ DESY und Universität Hamburg treiben mit dem Gründerzentrum ihre erfolgreichen Aktivitäten beim Wissens- und Innovationstransfer weiter voran. Die Freie und Hansestadt Hamburg zahlt hierfür einen Investitionszuschuss von 14,2 Millionen Euro.



Architekturzeichnung des geplanten Innovationszentrums

Zielgruppen sind Ausgründungsinteressenten und Ausgründungen aus DESY und der Universität sowie bereits am Markt operierende kleinere Technologieunternehmen.

Bereits jetzt gehen die ersten DESY-Ausgründungen an den Start: Die Firma X-Spectrum entwickelt, baut und vertreibt Röntgendetektoren, die bei DESY entwickelt wurden, sowie die dazugehörige Software. Auch die suna-precision GmbH fokussiert sich auf Experimente mit Röntgenstrahlung, für die spezielle, hochpräzise Geräte entwickelt und vertrieben werden. Class 5 Photonics ist eine gemeinsame Ausgründung von DESY und Helmholtz-Institut Jena und baut sehr flexible Femtosekundenlaser, die kurze Pulse mit hoher Leistung zur Verfügung stellen.

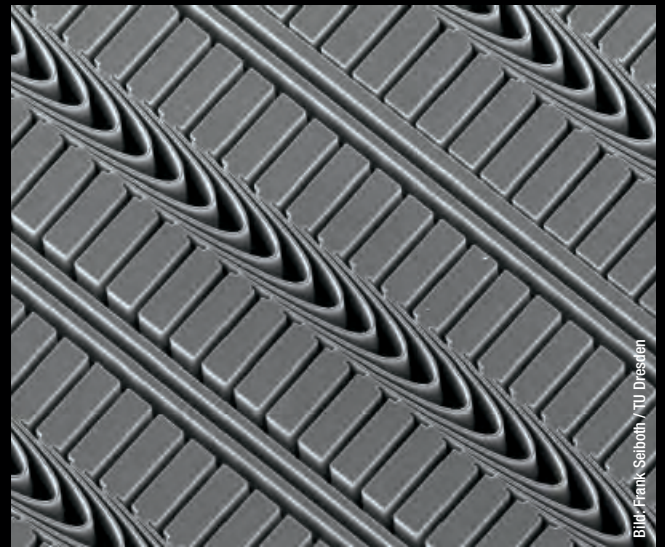
## Forscher entwickeln neuen Typ von Röntgenlinse

Forscher haben bei DESY einen wichtigen Erfolg auf dem Weg zu neuartigen Röntgenlinsen aus Diamant erreicht. Ein Team von Wissenschaftlern der Technischen Universitäten Dresden und Chemnitz sowie von DESY hat eine neue Bauform der Linsen erfolgreich getestet.

Mit hellen Röntgenquellen wie DESYs Anlage PETRA III durchleuchten Forscher vielfältige Materialien – von Biomolekülen über Solarzellen bis zu künstlichem Magma – und erkunden so deren innere Struktur. Für diese Untersuchungen ist es häufig nötig, das intensive Röntgenlicht zu fokussieren. „Bei der Röntgenmikroskopie wird die räumliche Auflösung oft durch die Röntgenoptik begrenzt und nicht wie bei der optischen Mikroskopie durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts“, erläutert Christian Schroer, wissenschaftlicher Leiter von PETRA III.

Röntgenstrahlung lässt sich nicht mit gewöhnlichen Linsen bündeln wie sichtbares Licht. Stattdessen benutzen Wissenschaftler zu diesem Zweck Speziallinsen, die gegenwärtig aus Silizium gefertigt werden. Das Team um Schroer hat nun eine neue Bauform der Linsen ersonnen, die nicht mehr ein konkaves Profil bekommen, sondern aus feinen, gebogenen Lamellen aufgebaut sind, welche das Röntgenlicht bündeln.

Applied Physics Letters, 2014; DOI: 10.1063/1.4896914



Elektronenrastermikroskopische Aufnahme der neuartigen Lamellenlinse. Jede Lamelle ist rund 1,5 millionstel Meter (Mikrometer) dick.

## Jedes einzelne Elektron zählt

### Studie an Röntgenlaser FLASH zeigt Schwachstelle im Verständnis von Festkörpern

Trotz jahrelanger, intensiver Forschung bleiben viele ungewöhnliche elektrische, thermische und magnetische Eigenschaften moderner Materialien ein Rätsel. Eine Studie an DESYs Freie-Elektronen-Laser FLASH zeigt jetzt eine Schwachstelle in den theoretischen Beschreibungen von Feststoffen, die einem besseren Verständnis des Verhaltens von Werkstoffen im Wege steht.

Die Studie stellt die übliche Annahme in Frage, dass einzelne Elektronen auf Materialeigenschaften wenig Einfluss haben. Die neuen Ergebnisse weisen darauf hin, dass selbst kleinste Änderungen der elektrischen Ladung in Feststoffen eine große Wirkung haben. Dieses unerwartete Ergebnis könnte

Aufschluss über Hochtemperatur-Supraleitung und andere unerklärte Phänomene in modernen Materialien geben. Und damit einen neuen Weg öffnen, um komplexe Materialeigenschaften nach Wunsch herzustellen und in Anwendungen nutzbar zu machen.

Hochtemperatur-Supraleiter sind fast 30 Jahre lang bekannt, doch noch immer nicht verstanden. Bei Unterschreitung einer bestimmten Temperatur leiten Hochtemperatur-Supraleiter Elektrizität verlustfrei und könnten daher eines Tages als energiesparende Materialien in Alltagsanwendungen zum Einsatz kommen.

Physical Review Letters, 2014; DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.067001

## Flüssig bei minus 46 Grad Celsius

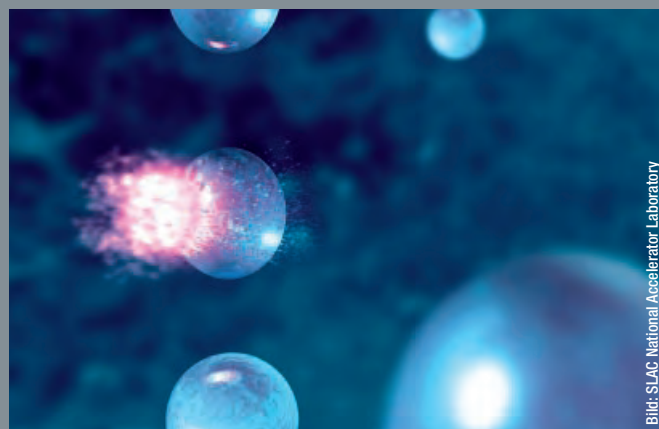
### Röntgenlaser untersucht Struktur von unterkühltem Wasser

Forscher haben erstmals die innere Struktur von Wasser erkundet, das trotz Kühlung auf minus 46 Grad Celsius noch flüssig ist. Die innere Ordnung dieses unterkühlten Wassers nimmt demnach mit fallender Temperatur kontinuierlich zu, wie das Team um Anders Nilsson vom US-Beschleunigerzentrum SLAC mit dem dortigen Röntgenlaser Linac Coherent Light Source LCLS beobachtet hat. Die Untersuchung liefert einen ersten Einblick in ein weitgehend unkartiertes Niemandsland im Zustandsdiagramm von Wasser.

„Wasser ist nicht nur unverzichtbar für Leben, wie wir es kennen“, erläutert Nilsson. „Verglichen mit anderen Flüssigkeiten hat es auch ziemlich seltsame Eigenschaften.“ Ein Beispiel ist die sogenannte Dichteanomalie, die dafür sorgt, dass gefrorenes Wasser, also Eis, leichter ist als flüssiges Wasser und schwimmt. Normalerweise gefriert Wasser bei null Grad Celsius. Sehr reines Wasser ohne jegliche Kristallisationskeime kann jedoch bis weit unter den Gefrierpunkt flüssig bleiben – Physiker sprechen dann von unterkühltem Wasser. „Forscher wissen seit langem, dass Wasser auch bei extrem kalten Temperaturen noch flüssig sein kann“, erläutert DESY-Forscher Anton Barty vom Center for Free Electron Laser Science CFEL, der an der Untersuchung mitarbeitete. „Aber es ist zuvor niemals gelungen, verlässliche Strukturinformationen für flüssiges Wasser unterhalb von etwa minus 38 Grad Celsius zu gewinnen.“

Denn bei derart kalten Temperaturen bleibt auch unterkühltes Wasser nur für winzige Sekundenbruchteile flüssig, bevor es plötzlich zu Eis gefriert. Dank der ultrakurzen und extrem hellen Röntgenblitze der LCLS konnten die Forscher dem stark unterkühlten Wasser nun bei bis zu minus 46 Grad seine innere Struktur entlocken. Die Ergebnisse zeigen, dass die innere Ordnung von unterkühltem Wasser mit fallender Temperatur immer stärker zunimmt. Nilsson hofft, noch deutlich kältere Temperaturen erreichen zu können, um zu testen, ob die ungewöhnlichen Eigenschaften von Wasser an einem bestimmten Punkt gipfeln. „Unser Ziel ist, diese Dynamik so weit wie möglich zu verfolgen. Letztendlich wird uns das Verständnis der Vorgänge im Niemandsland helfen, Wasser grundsätzlich unter allen Bedingungen zu verstehen.“

Nature, 2014; DOI: 10.1038/nature13266



Künstlerische Darstellung eines LCLS-Röntgenlaserblitzes, der einen unterkühlten Wassertropfen trifft.

Bild: SLAC National Accelerator Laboratory

## Lipidmoleküle in Bewegung

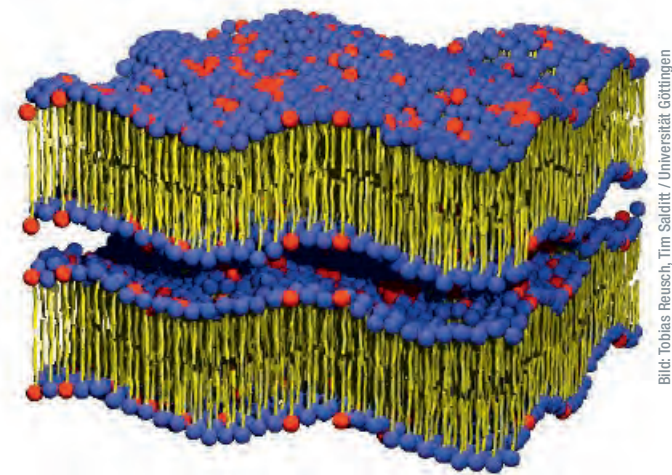
### Röntgen-Stroboskop liefert neue Einblicke in die Dynamik von Biomolekülen

Mit einem Röntgen-Stroboskop haben Forscher bei DESY die Bewegung von Lipidmolekülen aufgezeichnet. Die Untersuchung liefert neue Einblicke in die Dynamik spezieller Biomoleküle, aus denen unter anderem Zellmembranen aufgebaut sind. Letztere bestehen aus einer Doppelschicht von Lipidmolekülen und kontrollieren den Austausch von Substanzen in lebenden Zellen.

Die Wissenschaftler um Tim Salditt von der Universität Göttingen hatten an einem Stapel Lipidmembranen gezielt mit Ultraschall gerüttelt und mit der Röntgenlichtquelle PETRA III beobachtet, dass sich die Membranen nicht nur auf und ab bewegten. Auch ihre innere Struktur begann zu schwingen. „Die aus zwei Lipidmolekülschichten bestehenden Membranen veränderten sowohl ihre Dicke als auch ihre Dichte in periodischer Weise unter dem Einfluss der von außen erzwungenen Bewegung“, erklärt Tobias Reusch von der Universität Göttingen.

„Ähnliche Strukturveränderungen könnten sich in Membranen biologischer Zellen aus zeitlichen Kräfteschwankungen ergeben“, ergänzt Salditt. „Die Visualisierung der molekularen Strukturveränderungen mit unserer stroboskopischen Methode ermöglicht nun neue Erkenntnisse über die dynamischen Eigenschaften dieser sogenannten weichen Materie.“

Physical Review Letters, 2014; DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.118102



Die Anregung eines Stapels von Lipidmembranen durch Ultraschall führt zu kollektiven Schwingungen.

## Photosynthese in Aktion

### Erste Filmszene der molekularen Dynamik im Photosystem II

Ein internationales Forscherteam unter Beteiligung von DESY hat einen zentralen Schritt der Photosynthese erstmals in Aktion festgehalten. Die Gruppe unter Leitung von Petra Fromme von der Arizona State University nutzte den weltweit stärksten Röntgenlaser am US-Beschleunigerzentrum SLAC, um Standbilder eines Molekülkomplexes namens Photosystem II aufzunehmen. Das Photosystem II spaltet unter Einfluss von Sonnenlicht Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff.



Die sonnenlichtgetriebene Photosynthese ist die Energiequelle aller grünen Pflanzen.

„Dies ist die erste Szene eines molekularen Films, der die lichtgesteuerte Spaltung von Wasser im Photosystem II zeigt und damit jenen Prozess, der sämtlichen Sauerstoff in der Atmosphäre erzeugt“, betont Fromme. Die Beobachtung zeigt mit molekularer Detailgenauigkeit, wie das Photosystem II in diesem Prozess seine Form deutlich verändert.

„Ein tieferes Verständnis der Photosynthese könnte beispielsweise der Entwicklung besserer Solarzellen dienen und vielleicht die Suche nach dem ‚Heiligen Gral‘ der Biochemie, der künstlichen Photosynthese, voranbringen“, erläutert DESY-Forscher Henry Chapman vom Center for Free-Electron Laser Science CFEL, der an der Studie mitgearbeitet hat.

Nature, 2014; DOI: 10.1038/nature1345



## DESY und IBM entwickeln Big-Data-Lösung für die Forschung

DESY und der IT-Konzern IBM haben eine Kooperation zur Entwicklung einer Big-Data-Speicherlösung für die Forschung geschlossen. DESY setzt dazu ein IBM-Speichersystem ein, das große Datenmengen extrem schnell handhaben kann. An modernen Forschungslichtquellen wie PETRA III bei DESY werden extrem viele Daten erzeugt, wenn Wissenschaftler atomgenau die Struktur ihrer Proben unter die Röntgenlupe nehmen – von neuartigen Halbleitern über Katalysator-materialien bis hin zu lebenden Zellen.

Die Daten müssen zuverlässig gespeichert und verarbeitet werden. Dazu entwickeln DESY und IBM Research eine Lösung auf Basis des IBM-Systems Software-Defined-Storage mit dem Codenamen Elastic Storage. Diese nach oben skalierbare Lösung soll die bis zu 20 Gigabyte Daten, die pro Sekunde an den PETRA-III-Messstationen erzeugt werden, speichern und für die Analyse vorhalten. So sollen Forscher schnelleren Zugang zu ihren Messdaten bekommen.

Die Skalierbarkeit des Systems soll auch bei künftigen Herausforderungen bei der Verarbeitung von Forschungsdaten helfen. Mit dem europäischen Röntgenlaser European XFEL bauen DESY und internationale Partner derzeit eine Forschungslichtquelle, die noch sehr viel mehr Daten produzieren wird als PETRA III. „Wir erwarten vom European XFEL etwa 100 Petabyte pro Jahr, also 100 Millionen Gigabyte“, erläutert der Leiter der DESY-IT-Abteilung Volker Gülzow. Das ist vergleichbar mit dem

Datenvolumen des weltgrößten Teilchenbeschleunigers Large Hadron Collider LHC am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf.

„Die Software-Defined-Technologien von IBM können DESY mit der nötigen Skalierbarkeit, Geschwindigkeit und Agilität versorgen, damit das Forschungszentrum in Zukunft Analysen als Service in Echtzeit anbieten kann“, sagt Jamie Thomas, General Manager Storage and Software Defined Systems bei IBM. „IBM kann von den Erfahrungen mit DESY profitieren und diese in andere datenintensive wissenschaftliche Bereiche wie etwa Astronomie, Klimaforschung und Geophysik einbringen. Dort können dann ebenfalls Speichersysteme errichtet werden für die Analyse von Daten, welche von verteilten Detektoren und Sensoren erzeugt worden sind.“



Blick ins DESY-Rechenzentrum

## FEMTOMENAL

Big Data

# 5 368 709 120 Bit pro Sekunde


liefert ein moderner Röntgendetektor. Das entspricht in etwa einer kompletten CD-ROM in jeder Sekunde. An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III läuft aber nicht nur ein Röntgendetektor, es gibt 14 Messstationen, die gegenwärtig auf 24 erweitert und mit neueren, noch

leistungsfähigeren Detektoren ausgerüstet werden. Das DESY-Rechenzentrum muss daher bis zu 20 Gigabyte Daten pro Sekunde allein von PETRA III verarbeiten – das entspricht einem Stapel von 31 CD-ROMs in jeder Sekunde.

# *Surfen* auf der Plasmawelle

Elektronen-Booster im handlichen Format  
könnten die Beschleunigertechnologie  
revolutionieren

Plasmabeschleuniger im Fokus: In einer Plexiglas-halterung (Bildmitte) befindet sich die Plasmazelle. Sie besteht aus zwei Saphirblöcken, in die mit einem Laser jeweils eine halbrunde Kerbe gefräst wurde. Beide sind so zusammengesetzt, dass ein mehrere Zentimeter langer kreisrunder Hohlraum entsteht, der nicht viel breiter als ein menschliches Haar ist. Dieser Hohlraum wird dann mit Wasserstoff gefüllt, aus dem das Plasma erzeugt wird.



Immer kleiner und kompakter und zugleich enorm leistungsstark – dieser Trend hat nicht nur die Unterhaltungselektronik erfasst, sondern führt auch in der Forschung zu neuen Perspektiven. Je tiefer das Verständnis von den ultraschnellen Abläufen zwischen Elektronen, Atomen und Molekülen reicht, desto konkreter werden Anwendungen auf kleinster Skala, die noch vor wenigen Jahrzehnten utopisch erschienen. Selbst die kilometerlangen Teilchenbeschleuniger, die zu den größten Wissenschaftsmaschinen der Welt zählen, könnten eines Tages durch kompakte Anlagen abgelöst werden, die auf Beschleunigungselemente im Zentimetermaßstab setzen. Möglich machen könnte das eine Technologie, die auf einem exotischen Materiezustand basiert: dem Plasma. Darin sind die Atome aufgespalten in positiv geladene Ionen und negativ geladene Elektronen, die sich frei bewegen können. Bereits heute lassen sich in einem Plasma Wellen erzeugen, die Elektronen auf Energien im Bereich von Milliarden Elektronenvolt beschleunigen können. Forscher auf dem DESY-Campus wollen die Prozesse, die dabei in Sekundenbruchteilen auf der Skala von millionstel Metern ablaufen, im Detail verstehen und nutzbar machen. Das wäre der Startschuss für eine Fülle von Anwendungen der neuen Plasmabeschleuniger.



Bild: Heiner Müller-Elsner, © DESY



Jens Osterhoff und sein Team nutzen den Elektronenstrahl aus dem FLASH-Beschleuniger für Versuche mit Plasmazellen.

Langsam dreht Jens Osterhoff die anderthalb Zentimeter dicke Plexiglas-scheibe zwischen Daumen und Zeigefinger, die er in seiner Doktorarbeit intensiv studiert hat. „Darin stecken zwei Saphirblöcke“, erklärt er. „Zwischen ihnen befindet sich ein nur 0,3 Millimeter breiter Kanal mit Wasserstoffgas. Hier wird das Plasma erzeugt.“ Sehen kann man nicht viel, denn der Spalt zwischen den Saphiren ist nicht viel breiter als ein menschliches Haar. Doch mit Osterhoffs Plasmazelle lassen sich Teilchenenergien von einem Gigaelektronenvolt erzielen, das entspricht einer Milliarde Elektronenvolt. – Das war vor fünf Jahren.

Heute leitet Osterhoff ein Team von rund 20 Wissenschaftlern und Studenten bei DESY, und auch die Plasmabeschleuniger entwickeln sich rasant weiter und erreichen mittlerweile Rekorde im Bereich von mehreren Gigaelektronenvolt. „Durch die viel größeren Feldstärken, die in Plasmen erzeugt werden können, lassen sich die zur Beschleunigung erforderlichen Strecken von Kilometern auf Meter reduzieren“, erläutert Osterhoff. „Der knapp 100 Meter lange Beschleuniger von FLASH beispielsweise entspräche einer Plasmazelle im Zentimetermaßstab.“

Doch noch ist das Zukunftsmusik, und die großen Beschleunigeranlagen sind durch nichts zu ersetzen. Auch Osterhoff setzt für seine Forschung auf den großen FLASH-Beschleuniger bei DESY, der einen der begehrten Freie-Elektronen-Röntgenlaser antreibt und dafür einen besonders feinen Strahl aus extrem kleinen Elektronenpaketen erzeugt. Genau den nutzen Osterhoff und sein Team in dem Projekt FLASH-Forward, um in einer zehn Zentimeter langen Plasmazelle Elektronen zu beschleunigen und die Prozesse dabei genau unter die Lupe zu nehmen.



Bild: Nicole R. Fuller / Science Photo Library

Künstlerische Darstellung der Plasmabeschleunigung: Ein Laserblitz (rot) erzeugt Plasmawellen, auf denen Elektronen surfen.

Das Prinzip: Schießt man in eine Plasmazelle einen sogenannten Treiber, also entweder einen energiereichen Teilchenstrahl oder einen intensiven Laserblitz, werden Elektronen aus den Gasatomen herauskatapultiert, ein Plasma entsteht. Zurück bleiben positiv geladene Atomkerne, während die Elektronen hinter dem Treiber eine Art Heckwelle bilden, in der sich sehr hohe elektrische Felder ausbilden. Diese Plasmawelle nutzen Osterhoff und sein Team als Teilchenbeschleuniger. „Die Elektronen surfen quasi auf der Plasmawelle und werden dadurch beschleunigt“, erläutert Osterhoff. Elektronenstrahlen als Treiber sind vor allem für Anwendungen in der Teilchenphysik interessant, wenn Elektronen möglichst effizient auf möglichst hohe Energien beschleunigt werden sollen. „Noch sind wir weit davon entfernt, mit Plasmabeschleunigern Teilchenstrahlen in der für die Hochenergiephysik erforderlichen Qualität erzeugen zu können, in 20 Jahren sieht das möglicherweise anders aus“, sagt Osterhoff.

2016 wird FLASHForward richtig loslegen und die FLASH-Strahlen für Experimente nutzen. Bis dahin laufen Vorversuche, unter anderem in Zusammenarbeit mit dem US-Beschleunigerzentrum SLAC in Kalifornien. Außerdem forschen Arbeitsgruppen von DESY und der Universität Hamburg gemeinsam unter dem Dach von LAOLA, dem Laboratory

for laser- and beam-driven plasma acceleration an einem Ziel. „Wir wollen die Plasmabeschleuniger zur Anwendungsreife führen“ sagt Florian Grüner, Sprecher von LAOLA.



**„Unser Ziel ist es, den ersten Table-top-FEL zu bauen, also einen Freie-Elektronen-Laser im kompakten Laborformat.“**

Florian Grüner, Sprecher der LAOLA-Gruppe

„Zurzeit betreiben wir Grundlagenforschung, um stabile und kontrollierbare Elektronenstrahlen hoher Qualität zu erzeugen.“ Nur damit ließen sich beispielsweise die Freie-Elektronen-Röntgenlaser von morgen betreiben, deren Abmessungen im Bereich von Metern lägen und nicht wie bei den heutigen Anlagen im Bereich von Kilometern. „LAOLA ist weltweit führend auf dem Weg zu Freie-Elektronen-Lasern, die auf Plasmabeschleunigern basieren“, betont Grüner. „Unser Ziel ist es, den ersten

Table-top-FEL zu bauen, also einen Freie-Elektronen-Laser im kompakten Laborformat. Wir wollen in den nächsten vier bis fünf Jahren zeigen, dass so eine Anlage prinzipiell funktioniert – das wäre ein entscheidender Durchbruch!“

Bei DESY stehen den Beschleunigerexperten verschiedene Anlagen zur Verfügung. Experimente mit Plasmawellen sind nicht nur an FLASH möglich, sondern auch am Photoinjektor-Teststand PITZ am DESY-Standort in Zeuthen sowie an REGAE, einem Aufbau, der extrem kurze Elektronenpakete erzeugt. Dass sich diese Pionierarbeiten lohnen, wird aus dem enormen Anwendungspotenzial deutlich, das Freie-Elektronen-Röntgenlaser bieten: Die atomare Struktur einzelner Moleküle aufzuklären, chemische Reaktionen in Echtzeit quasi zu filmen – das eröffnet völlig neue Möglichkeiten für Strukturbiochemie und Medizin, Materialforschung und Nanotechnologie. Große Anlagen wie der drei Kilometer lange European XFEL, der derzeit in der Metropolregion Hamburg gebaut wird, stehen dafür bereit. Sie sind aber so groß, aufwendig und teuer, dass sie auf wenige Standorte weltweit beschränkt bleiben. „Wenn es uns gelingt, kompakte Freie-Elektronen-Laser im Labormaßstab zu realisieren, könnte diese Zukunftstechnologie breite Anwendung auch in Universitäten, Krankenhäusern oder Industrieunternehmen finden“, schwärmt Grüner. „Alles, was wir dazu brauchen, ist ein leistungsstarker Laser als Treiber, ein Plasmabeschleuniger im Zentimetermaßstab, ein Undulator, also eine Magnetanordnung, in der die beschleunigten Elektronen Röntgenblitze aussenden, und der Experimentaufbau mit der Probe.“

Bis es soweit ist, müssen die Beschleunigerphysiker allerdings noch viele grundlegende Erkenntnisse über Prozesse gewinnen, die innerhalb von Femtosekunden stattfinden (das ist der unvorstellbar kurze milliardste Teil einer millionstel Sekunde), und zwar in einem Plasma, in dem extrem hohe Kräfte wirken zwischen Teilchen und Wellen, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Kein einfaches Unterfangen, aber auf dem DESY-Campus in Hamburg ist die Expertise dafür vorhanden, betont Ralph Aßmann, der mit seiner Gruppe neue Beschleunigertechnologien bei DESY entwickelt: „Wir haben hier Experten, die ultraschnelle Prozesse erforschen, wir haben Spezialisten für

Hochleistungslaser, fokussierte Elektronenstrahlen und jahrzehntelange Erfahrung im Beschleunigerbau. Über Instituts- und Fachgrenzen hinweg bündeln wir diese Kompetenzen, um Plasma-beschleuniger praxistauglich zu machen. Bislang lassen sich zwar immer neue Beschleunigungsrekorde mit Plasmazellen aufstellen, doch wir können die Prozesse weder genau genug kontrollieren, noch steuern, also auch nicht nutzen.“



**„Der Durchbruch, die Beschleunigung im Plasma hinreichend genau zu kontrollieren, soll bei DESY erfolgen!“**

Ralph Aßmann, Beschleunigerexperte bei DESY

Neben den bestehenden Forschungsmöglichkeiten setzen Aßmann und sein Team auf eine neue Anlage speziell für die Beschleunigerforschung: SINBAD, klangvolle Kurzform für Short Innovative Bunches and Accelerators at DESY. „Mit SINBAD können wir zukünftige Beschleunigertechniken erforschen und zur Anwendungsreife führen“, erläutert Aßmann. Dafür wird der Tunnel des alten DORIS-Beschleunigers bei DESY wiederverwendet und mit neuer Technik bestückt. Zurzeit ist SINBAD noch in der Planungsphase, Teams von LAOLA arbeiten mit, und ab 2016 beginnt der Aufbau der Anlage. Das Ziel der Beschleunigerphysiker ist klar: „Der Durchbruch, die Beschleunigung im Plasma hinreichend genau zu kontrollieren, soll bei DESY erfolgen!“, sagt Aßmann. Dabei geht es nicht nur darum, praxistaugliche, kompakte Teilchenbeschleuniger zu entwickeln, die neue Einsatzgebiete in Wissenschaft, Medizin und Industrie erschließen. „Auch für die nächste Generation der Hochenergiebeschleuniger brauchen wir einen Plan B“, betont Aßmann, der selber intensiv an dem 27 Kilometer langen LHC-Beschleuniger bei Genf mitgearbeitet hat. „Die konventionellen Beschleuniger stoßen künftig einfach an ihre ganz praktischen Grenzen, was Größe und Machbarkeit angeht.“

# Abguss statt Original

Per Zufall entlarvten Archäologen bei DESY eine spektakuläre Fälschung

Lange hatte es als archäologischer Schatz gegolten – ein Ensemble von bronzezeitlichen Beilen, das im 19. Jahrhundert angeblich in einer feuchten Wiese in Schleswig-Holstein entdeckt worden war. Doch dann nahmen Archäologen eines der Stücke mit dem intensiven Röntgenstrahl eines Teilchenbeschleunigers bei DESY unter die Lupe. Das Resultat schockierte die Fachleute: Das Beil erwies sich als Fälschung, ebenso wie fast alle anderen Objekte des Fundes.

Das Ergebnis zeigt, wie wertvoll physikalische Messmethoden für die Archäologie sein können – selbst wenn der vermeintliche Wert eines Fundes zugunsten der Wahrheit rapide sinkt. Begonnen hatten die Experten ihre Zusammenarbeit vor einigen Jahren, als sie am Speicherring DORIS ein bronzezeitliches Beil analysierten: Das „Beil von Ahneby“ ist rund 4000 Jahre alt, wiegt 700 Gramm und dürfte dereinst als Kultgegenstand fungiert haben. „Als wir das Beil abscannten, bemerkten wir, dass seine Oberfläche ursprünglich von vielen Löchern übersät war“, erläutert Mechtild Freudenberg vom Archäologischen Landesmuseum Schloss Gottorf. Diese sogenannten Lunken dürften beim Herstellungsprozess entstanden sein, dem Bronzezuguss.

Doch die bronzezeitlichen Handwerker wussten Rat und wandten eine raffinierte Methode an, um die Klinge zu glätten. „Wir haben entdeckt, dass die Lunken mit reinem Zinn verfüllt waren“, sagt Freudenberg. „Offenbar hatten die Handwerker das Beil ausgebessert,

indem sie Zinnperlen in die Löcher hämmerten.“ Ein prähistorisches Flickwerk, das erst mit der hochintensiven Röntgenstrahlung von DORIS sichtbar wurde.

Nach diesem Erfolg untersuchte das Team um den DESY-Physiker Leif Glaser weitere Beile mit der zerstörungsfreien Methode. Eigentlich wollte es nur die Arbeitsspuren auf den Klingen näher inspizieren. Doch bei einem der Werkzeuge wurden die Fachleute stutzig, die Messwerte zeigten Unstimmigkeiten. „Als wir dann mit dem Röntgenstrahl die chemische Zusammensetzung analysierten, kam uns ein Verdacht“, sagt Freudenberg. „Das Beil enthielt deutlich zu viel Eisen und Zinn, stammte also vielleicht gar nicht aus der Bronzezeit.“

Ein echter Schatz: Das „Beil von Ahneby“ stammt wirklich aus der Bronzezeit.

Weitere Analysen zeigten, dass die deutlich sichtbaren Abdrücke der Hammerschläge nur oberflächlich waren. Im Inneren des Materials dagegen fanden sich keinerlei schmiedetypische Veränderungen der Kristallstruktur. Freudenbergs Schlussfolgerung: „Wir haben es zunächst nicht glauben wollen, aber bei diesem Beil handelt es sich um einen Abguss, also eine Fälschung!“

Eine unliebsame Überraschung für die Experten. Schließlich stammte das Beil aus vermeintlich sicherer Quelle: 1864 hatte es der renommierte Privatsammler Johann Detlef Marxen dem Schleswiger Museum vermacht – zusammen mit 21 weiteren Gegenständen, die angeblich in derselben bronzezeitlichen Fundstelle entdeckt worden waren, einer feuchten Wiese in der Nähe von Kappeln. Neben 15 Beilen umfasste der Fund auch Meißel sowie Schmuckgegenstände.

Als das Team auch diese anderen Artefakte abscannte, kam es zu einem ernüchternden Resultat: Bis auf eine dünne, 25 Zentimeter lange Gewandnadel erwies sich alles als Fälschung. Zwar lässt sich heute nicht mehr

rekonstruieren, wer die Artefakte im 19. Jahrhundert nachgemacht hat. Doch die Messungen bei DESY verrieten, dass damals nicht alle 21 Fälschungen gleichzeitig entstanden

waren – sie bestehen aus unterschiedlichen Legierungen. „Der Fälscher nahm offenbar immer das, was gerade zur Hand war“, vermutet Mechtild Freudenberg. „Wir denken, dass es jemand war, der in einer Metallgießerei arbeitete.“

Die Archäologen aus Schleswig und die Physiker aus Hamburg wollen auch künftig ihre Zusammenarbeit fortsetzen – ein interdisziplinäres Zusammenspiel, das für weitere Detektivgeschichten aus der Vergangenheit gut sein könnte.





# Livebilder aus dem Nanokosmos

Forscher sehen Schichten aus Fußballmolekülen beim Wachsen zu

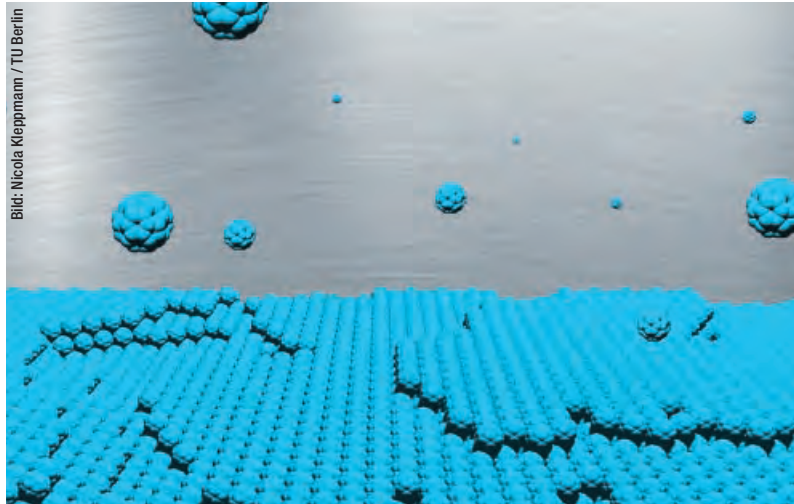


Bild: Nicola Kleppmann / TU Berlin

Künstlerische Darstellung des Schichtwachstums der Fußballmoleküle

Forscher haben bei DESY live beobachtet, wie sich fußballförmige Kohlenstoffmoleküle zu ultraglaten Schichten ordnen. Die Wissenschaftler haben sogenannte Buckyballs untersucht. Das sind kugelförmige Moleküle, die aus 60 Kohlenstoffatomen ( $C_{60}$ ) bestehen. Da sie an die geodätischen Kuppeln des US-Architekten Richard Buckminster Fuller erinnern, werden sie auch Buckminster-Fullerene oder kurz Buckyballs genannt. Mit ihrer Struktur aus abwechselnden Fünf- und Sechsecken ähneln sie außerdem winzigen, molekularen Fußballen.

Die Untersuchung an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III ermöglicht zusammen mit theoretischen Modellrechnungen erstmals, die Schichtbildung grundlegend zu verstehen. Damit wird künftig auch die gezielte Konstruktion von Nanostrukturen aus diesen Kohlenstoffmolekülen möglich, die eine zunehmend wichtige Rolle in der zukunftssträchtigen Plastikelektronik und zum Beispiel in Handy-Displays spielen. An der Untersuchung waren die Humboldt-Universität Berlin, die Technische Universität Berlin, die Universität Tübingen und DESY beteiligt.

Im Röntgenlicht beobachteten die Forscher, wie sich aus einem Dampf von Buckyballs die kugelförmigen Moleküle auf einem Substrat ablageren. Tatsächlich entsteht dabei eine Lage nach der anderen, die

Kohlenstoffmoleküle wachsen vorwiegend in Inseln mit einer Höhe von nur einem Molekül und bilden kaum Türmchen. „Die erste Lage ist zu 99 Prozent fertig gewachsen, bevor das erste Prozent der zweiten Lage entstanden ist“, berichtet DESY-Forscher Sebastian Bommel. Auf diese Weise bilden sich extrem glatte Schichten.

„Damit wir die Wachstumsprozesse wirklich live beobachten konnten, mussten wir die Oberfläche auf molekularer Ebene schneller vermessen als eine einzelne Schicht wächst, was ungefähr im Minutenabstand stattfindet“, erläutert Stephan Roth, Leiter der Messstation  $PO_3$ , an der die Versuche stattfanden. „Dafür ist die Röntgenstreuung besonders geeignet, mit der sich das Wachstum detailliert verfolgen lässt.“

„Unsere Ergebnisse liefern fundamentale Einblicke in die molekularen Wachstumsprozesse eines Systems, das ein wichtiges Bindeglied zwischen der Welt der Atome und derjenigen der Kolloide darstellt“, ergänzt Nicola Kleppmann von der Technischen Universität Berlin. Dank der Kombination aus experimentellen Beobachtungen und Modellrechnungen konnten die Wissenschaftler erstmals für ein derartiges System drei zentrale Energieparameter zugleich bestimmen.

„Durch diese Werte verstehen wir jetzt erstmals wirklich, wodurch das Wachstum von Nanostrukturen bestimmt wird“, betont Bommel. „Wenn man in die Zukunft denkt, ist es vorstellbar, mit diesem Wissen gezielt das Wachstum der Strukturen zu beeinflussen: Wie muss ich meine Parameter Temperatur und Depositionsrate verändern, um eine bestimmte Inselgröße wachsen zu lassen? Das könnte zum Beispiel für organische Solarzellen, die  $C_{60}$  beinhalten, interessant sein.“ Mit denselben Methoden wollen die Forscher in Zukunft auch das Wachstum weiterer molekularer Systeme erkunden.

Nature Communications, 2014; DOI: 10.1038/ncomms6388



DURCH DIE WACHSENDE ANTIBIOTIKARESISTENZ KÖNNEN DURCHFALLKEIME WIE ZUM BEISPIEL CHLOSTRIDIUM DIFFICILE UNGEHINDERT IHR SCHRECKLICHES WERK VOLLBRINGEN.

DURCHFALL- WELTHERRSCHAFT!

NICHTS KANN UNS STOPPEN!



UM DEM ENTGEGEN ZU WIRKEN, ARBEITEN WISSENSCHAFTLER AN HOCHSPEZIALISIERTEN VIREN.

HIER P-007. ICH BIN DRIN...



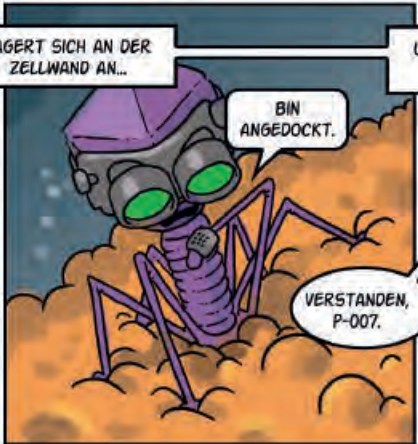
DIESE VIREN, ODER GENAUER BAKTERIOPHAGEN, KÖNNEN ZIELGERICHTET LEBENSBEDROHLICHE BAKTERIEN INFIZIEREN UND ZERSTÖREN.

HABE SICHT-KONTAKT!



DER PHAGE NÄHERT SICH DAFÜR DER WIRTSZELLE AN...

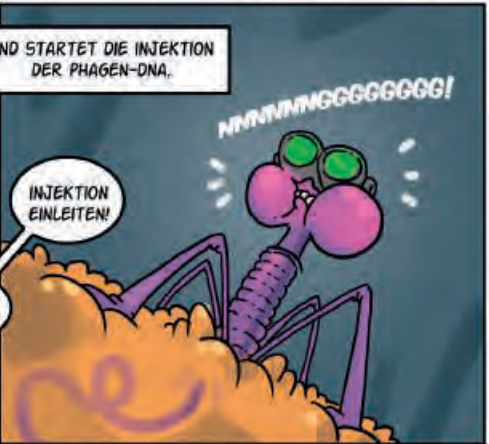
T MINUS 2 ZUM ZIELOBJEKT.



LAGERT SICH AN DER ZELLWAND AN...

BIN ANGEDOCKT.

VERSTANDEN, P-007.



UND STARTET DIE INJEKTION DER PHAGEN-DNA,

INJEKTION EINLEITEN!

NNNNNNGGGGGGGG!



NACH DER INJEKTION BEGINNT IN DER ZELLE DIE PRODUKTION NEUER PHAGEN.

INJEKTION ERFOLGREICH!

ZIEHE MICH ZURÜCK...



DIESE LÖSEN DURCH EIN ENZYM DIE ZELLWAND DES BAKTERIUMS AUF, ...

WAS PASSIERT MIT MIR?!

VERSTANDEN, P-007.

BLEIBEN SIE AUF SICHT-KONTAKT FÜR VISUELLE BESTÄTIGUNG.

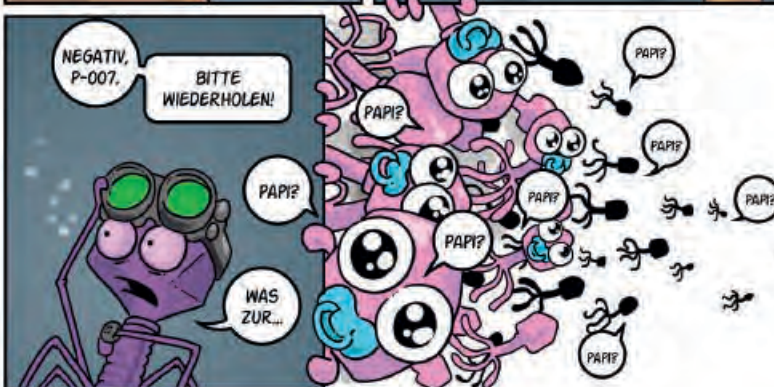


BIS DIESE DEM DRUCK NICHT MEHR STANDHÄLT UND...

HIER, P-007...

ZERSTÖRUNG VISUELL BESTÄ...

OH...



NEGATIV, P-007.

BITTE WIEDERHOLEN!

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

PAPI?

# 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](http://www.desy.de/femto)  
ISSN 2199-5184

## Redaktion

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

## An dieser Ausgabe haben mitgewirkt

Frank Grotelüschen  
Barbara Warmbein

## Gestaltung und Produktion

Monika Illenseer

## Druck und Bildbearbeitung

reset, Hamburg

## Coverbild

Gesine Born, Berlin

## Redaktionsschluss

November 2014

# femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie femto  
kostenlos!

[www.desy.de/femto](http://www.desy.de/femto) oder 040 8998-3613



## Titelbild

Neugier ist ein starker Antrieb. Nicht nur Kindern öffnet sie das Tor zur Welt. Forscher treibt sie dazu an, das Universum mit all seinen Bestandteilen und den Kräften, die darin wirken, zu erkunden und zu erklären. Eine Theorie, die viele Rätsel lösen würde, ist die Supersymmetrie. Die Bausteine für dieses neue Weltbild liegen vielleicht schon in greifbarer Nähe – wenn es sie denn gibt.



## 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.

DESY ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft, der größten Wissenschaftsorganisation Deutschlands.

[www.desy.de](http://www.desy.de)