

wir Phänomene auf noch kleineren Längenskalen beobachten“, sagte David Charlton, Sprecher der ATLAS-Kollaboration. Das bedeutet nicht nur einen tieferen Blick in die Grundbausteine der Materie, sondern könnte auch Hinweise auf winzige Extradimensionen liefern.

Ein Ziel ist es auf jeden Fall, mit dem LHC die Eigenschaften des Higgs-Teilchens noch genauer zu vermessen und herauszufinden – so Heuer –, ob es ein „Einzelkind“ ist

oder zu einer größeren Familie von Higgs-Teilchen gehört. Hoffnungen ruhen auch auf der Entdeckung neuer Teilchen mit größeren Massen, etwa solche, die supersymmetrische Theorien vorhersagen. Dies könnte ein Beitrag sein, um das Rätsel der Dunklen Materie zu lösen. Daneben soll der LHC neue Erkenntnisse über die Unterschiede zwischen Materie und Antimaterie und die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas liefern.

Ob und wann die Forscher mit dem LHC auf neue Teilchen oder neue Physik jenseits des Standardmodells stoßen werden, ist nicht abzusehen. „Das hängt davon ab, wie nett die Natur zu uns ist“, meinte Rolf-Dieter Heuer. Was er selbst in diesem Fall unter „nett“ versteht, erklärte er auch: „Wenn die Natur erlaubt, dass erstes Licht ins dunkle Universum fällt.“

Alexander Pawlak

## ■ Fahrplan für das Flaggschiff

Das Graphene Flagship hat Ende Februar eine Roadmap veröffentlicht, die den Stand der Forschung zusammenfasst und die wichtigsten Themenfelder identifiziert.

Graphen gilt als Wundermaterial des 21. Jahrhunderts. Es ist extrem dünn und 100- bis 300-mal reißfester als Stahl, es leitet elektrischen Strom und Wärme besser als jedes Metall, ist biokompatibel und transparent. Im Alltag ist Graphen bereits angekommen – als Teil eines Kompositmaterials, aus dem Tennisschläger hergestellt werden. Seit nunmehr zwei Jahren spielt die derzeitige Nummer 1 der Weltrangliste, Novak Djokovic, mit einem besonders stabilen und gut ausbalancierten Tennisschläger basierend auf Graphen-Technologie. Grund genug, dieses Wundermaterial genau zu erforschen und viele weitere Anwendungen zu erschließen. Diesen Aufgaben widmet sich seit anderthalb Jahren das Graphene Flagship – eine Initiative im Rahmen des EU-Programms „Future and Emerging Technologies“ mit einer Fördersumme von bis zu einer Milliarde Euro über zehn Jahre. Als Bestandsaufnahme und Ausblick haben die Partner des Flagships kürzlich eine Roadmap veröffentlicht, in der sie für verschiedene Anwendungsfelder die wichtigsten Herausforderungen und notwendigen Arbeitsschritte nennen.<sup>§)</sup>

Die Roadmap identifiziert drei Schwerpunkte für die künftige Arbeit: Erstens geht es darum, neue Schichtmaterialien über Graphen hinaus zu identifizieren und ihr Potenzial zu erkunden. Zweitens



K. Novoselov

Wie ein zerknittertes Seidentuch sieht eine einzelne Graphenschicht unter dem Elektronenmikroskop aus.

wollen die Forscher neuartige Gerätekonzepte basierend auf zweidimensionalen Materialien entwickeln. Drittens sollen Komponenten und Strukturen aus zweidimensionalen Materialien in bestehende Systeme integriert werden, um neue Funktionalitäten und Anwendungen zu ermöglichen. Die Roadmap ist untergliedert in elf verschiedene Bereiche, zu denen elektronische Bauteile, Spintronik, Photonik und Optoelektronik, flexible Elektronik, Kompositmaterialien oder auch biomedizinische Anwendungen zählen.

Der Bereich Biomedizin ist neu hinzugekommen. „Bisherige Elektronik basierend auf Silizium oder GaAs ist nicht besonders biokompatibel. Graphen besteht allerdings aus Kohlenstoff und lässt sich für

die Sensorik in der Biomedizin daher deutlich besser einsetzen“, erläutert Daniel Neumaier von der AMO GmbH in Aachen. Er selbst leitet den Bereich Hochfrequenztechnik, in dem es seit Beginn des Programms vor allem darum geht, die Prozesstechnologie zu entwickeln, um Graphen in Systeme einbinden bzw. daraus Bauteile fertigen zu können. „Unser Ziel wäre es, die Bauteile reproduzierbar wie beim Brezelbacken herzustellen“, sagt Neumaier.

Eine Herausforderung besteht allerdings darin, die Prozesstechnologie so zu skalieren, dass sie für die großtechnische Fertigung infrage kommt. Auch die Integration von Graphenbauteilen in die Silizium-Technologie ist bislang noch nicht geklärt. Angelegt ist

§) Das gesamte Dokument findet sich unter: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2015/nr/c4nr01600a>

das Flagship-Programm, an dem derzeit 142 Partner aus 23 Ländern beteiligt sind, auf zehn Jahre, doch Daniel Neumaier rechnet damit, dass es in einigen Bereichen auch länger dauern wird, bis Graphen in der Anwendung tatsächlich angekommen ist. „Wenn man sich die Vergangenheit anschaut, hat das in der Mikroelektronik eher 15 bis 20 Jahre gedauert. Selbst bei Kupfer waren es mehr als zehn Jahre von der Vorfeldforschung bis zur Anwendung, und Kupfer ist kein besonderes Material“, führt Neumaier aus.

In anderen Bereichen, vor allem bei Kompositmaterialien, ist die Forschung deutlich weiter fortgeschritten. Dort gilt es nun, die Toxizität und die Wirkung von Graphen auf die Umwelt zu untersuchen. Vor Ablauf der Förderdauer des Projekts sollen auch in anderen Bereichen erste Anwendungen zur Verfügung stehen, etwa in der flexiblen Elektronik, Sensorik oder Hochgeschwindigkeits-elektronik, wo Graphen völlig neue Funktionalitäten verspricht. Laut der Roadmap ist es nicht die Frage, ob Graphen neue Anwen-

dungen ermöglicht, sondern wie viele. Fraglich ist indes noch die Finanzierung: Etwa die Hälfte der Fördersumme von einer Milliarde Euro wollte die EU stellen, den Rest sollten die beteiligten Länder und Partner beisteuern. Von 2016 bis 2018 erhält das Flagship insgesamt 89 Millionen Euro, in der Periode danach rechnen die Forscher mit einem reduzierten Etat – geschuldet den Kürzungsplänen des EU-Kommissionspräsidenten Jean-Claude Juncker. Doch darüber ist das letzte Wort noch nicht gesprochen.

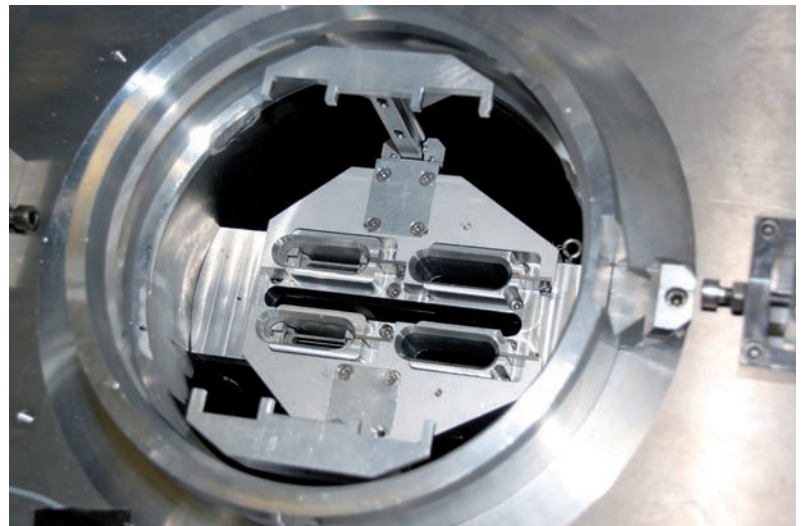
Maik Pfalz

## ■ Bestrahlung im Fingerhut

**In Garching wird die Forschungsneutronenquelle FRM II um eine weitere Bestrahlungsanlage ergänzt, damit sie ab 2018 Molybdän-99 produzieren kann. Aus diesem lässt sich das Radionuklid Technetium gewinnen.**

In den vergangenen Jahren schlugen Nuklearmediziner immer wieder Alarm, weil die Versorgung mit dem Radionuklid Technetium-99m bedroht war. Dieses metastabile Isotop ist das Arbeitspferd der Nuklearmedizin – in über drei Millionen Untersuchungen pro Jahr kommt es allein in Deutschland zum Einsatz. Doch gerade einmal acht Reaktoren weltweit produzieren das Mutternuklid Molybdän-99. Sechs davon sind älter als 40 Jahre und nähern sich dem Ende ihrer Betriebslaufzeit. Mehrfach kam es zu Engpässen, weil Reaktoren für aufwändige Wartungen stillgestanden haben oder längere Zeit ausgefallen sind. Aus diesem Grund haben Wissenschaftler an der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) 2009 in einer Machbarkeitsstudie gezeigt, dass sich der FRM II für nur 5,4 Millionen Euro aufrüsten lässt für die Produktion von Molybdän-99. Inzwischen sind viele Vorarbeiten erledigt.

Warum aber ist die Versorgung mit Technetium eigentlich so schwierig? Technetium-99m hat eine Halbwertszeit von nur sechs Stunden und lässt sich daher nicht auf Vorrat lagern. Sein Mutternuklid Molybdän-99 entsteht zu etwa sechs Prozent bei der Spaltung



Fotos: M. Pfalz

In diesen Halterungen stecken die Brennelemente. Vollautomatisch wird es möglich sein, bestrahlte Targets abzulegen und im gleichen Schritt ein unbestrahltes aufzunehmen.

von Uran-235. Mit einer Halbwertszeit von 66 Stunden zerfällt Mo-99 zu Tc-99m, das insbesondere für die Untersuchung von Schilddrüse, Lunge, Herz, Leber, Niere oder Skelett zum Einsatz kommt. Das metastabile Radioisotop bindet sich hervorragend an verschiedene stoffwechselaktive Substanzen, die sich gezielt beispielsweise an Zellen eines bestimmten Organs oder an Tumoren anheften. Beim Übergang in den stabilen Grundzustand emittiert Technetium-99m niederenergetische Gammastrahlung bei 140 keV, die fast keine Zellschäden

verursacht und die sich bei der Untersuchung nachweisen lässt. Aufgrund der hervorragenden Eigenschaften ist Technetium-99m in der Diagnostik durch kein anderes Isotop zu ersetzen. „Es ist unbestritten, dass Europa weitere Kapazitäten zur Produktion von Molybdän-99 bereitstellen muss. Dazu wollen wir beitragen“, sagt Heiko Gerstenberg, der maßgeblich an dem Umbau am FRM II beteiligt ist.

Die Arbeiten für den Umbau gehen mit großen Schritten voran, und doch gestalten sie sich schwierig. Das liegt auch an der