

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.

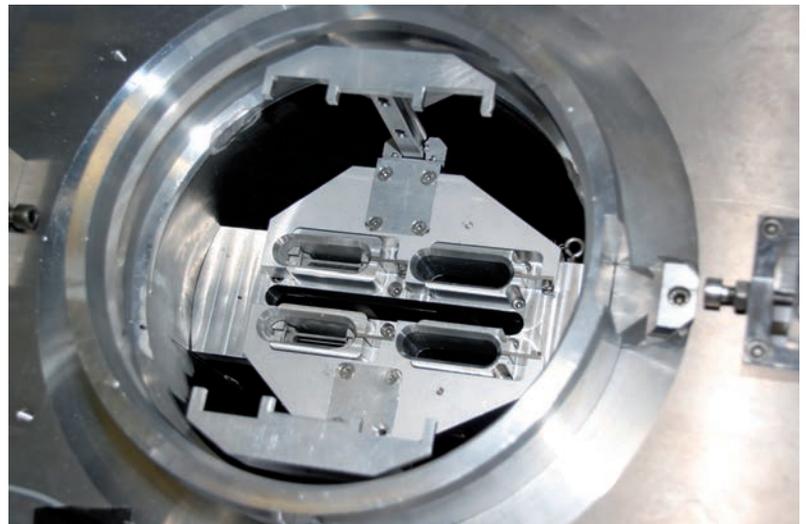
Maik Pfalz

## ■ 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

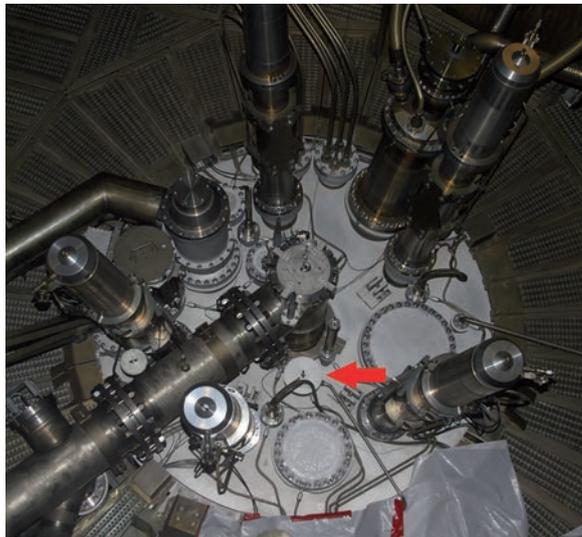
verursacht und die sich bei der Untersuchung nachweisen lässt. Aufgrund der hervorragenden Eigenschaften ist Technetium-99m in der Diagnostik durch kein anderes Isotop zu ersetzen. „Es ist unbestritten, dass Europa weitere Kapazitäten zur Produktion von Molybdän-99 bereitstellen muss. Dazu wollen wir 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

gewählten Bestrahlungsposition für die neue Molybdän-Anlage. Die muss nämlich so dicht am Brennelement des Reaktors wie möglich sein, damit besonders viele Neutronen auf das Urantarget treffen. Dafür bot sich nur ein Platz an, der schwer zugänglich ist und dessen Durchmesser nur neun Zentimeter beträgt. Die Targets, Halterungen, Wasserkühlung etc. müssen daher in einem schmalen Fingerhutrohr untergebracht werden, das die Wissenschaftler bereits an der gewählten Bestrahlungsposition installiert haben. Bis zu 16 Targets aus niedrig angereichertem Uran (LEU) lassen sich dort gleichzeitig bestrahlen. Die laufenden Reaktoren nutzen noch hoch angereichertes Uran zur Herstellung von Molybdän-99, das allerdings zukünftig zur Targetproduktion nicht mehr verfügbar sein wird. Der FRM II wird daher niedrig angereichertes Uran einsetzen, was die Projektarbeiten weit zurückgeworfen hat. Denn die Abnehmer der bestrahlten Targets haben lange gebraucht, um die Geometrie dafür festzulegen. „In der Zeit konnten wir nur mit den Hufen scharren“, bedauert Heiko Gerstenberg, „denn wenn Sie nicht wissen, wie das Target aussieht, können Sie schlecht eine Anlage dafür aufbauen.“



An dieser Versuchsanlage erproben die Wissenschaftler den gesamten Ablauf der Bestrahlung von niedrig angereichertem Uran zur Produktion von Molybdän-99. Rund 7,5 Meter groß ist der Aufbau und reicht noch fast vier Meter in den Keller hinein.



In dem Schacht unter der weißen Abdeckung (roter Pfeil) werden die niedrig angereicherten Urantargets mit Neutronen bestrahlt, um Molybdän zu erzeugen.

Inzwischen gibt es zumindest eine Versuchsanlage im Maßstab 1:1, an der die Wissenschaftler nicht nur alle Abläufe testen, sondern beispielsweise auch die Kühlung. „Bei der Bestrahlung entstehen über 400 Kilowatt Wärme, die abgeführt werden müssen. Das ist keineswegs trivial“, erläutert Winfried Petry, Wissenschaftlicher Direktor des FRM II. „Außerdem beeinflussen die zusätzlichen Urantargets empfindlich die Reaktivität des ganzen Reaktors.“ Aus diesem Grund muss der geplante Aufbau ein Genehmigungsverfahren nach dem deutschen Atomrecht durchlaufen. Den Antrag dafür wollen die Wissenschaftler in den nächsten Wochen einreichen.

Als nächstes soll an der Versuchsanlage der Antrieb erneuert werden, der die Targets im Reaktor versenkt und wieder aus der Bestrahlungsposition hinaus fährt. Noch ist es erforderlich, jeden Schritt manuell durchzuführen. Später soll alles voll automatisch ablaufen, und zwar komplett unter Wasser. Denn die gesamte Bestrahlung und der Betrieb des Reaktors finden zur Abschirmung im mehrere Meter tiefen Wasserbecken statt. Momentan planen die Wissenschaftler, ihre Anlage 2017 einbauen zu können – während einer regulären Wartungspause. Die Inbetriebnahme wird sukzessive erfolgen. „Wie genau wir die Anlage hochfahren, wird uns die Genehmigungsbehörde vorgeben“, erläutert Heiko Gerstenberg.

Während die deutschen Wissenschaftler bei der Versorgung

mit Technetium auf die Herstellung über Uranspaltung setzen, versuchen sich kanadische Wissenschaftler an alternativen Verfahren, beispielsweise mithilfe eines Teilchenbeschleunigers. Bei diesem entsteht hochenergetische Röntgenstrahlung, die aus einer Probe mit angereichertem Mo-100 ein Neutron aus dem Kern heraus schlägt und so Mo-99 erzeugen kann. Winfried Petry verhehlt seine Skepsis dazu nicht: „Diese Verfahren sind sehr teuer und können den Bedarf an Radioisotopen nicht decken.“ Darüber hinaus haben die Kanadier die Versorgungskrise mit Molybdän-99 überhaupt erst verursacht. Denn mit zwei Maple Reaktoren (Multipurpose Applied Physics Lattice Experiment) wollten sie sich Anfang des letzten Jahrzehnts das Monopol auf die Herstellung von Mo-99 sichern. Probleme bei der Inbetriebnahme des ersten der beiden Reaktoren führten allerdings dazu, dass diese nie in Betrieb gingen. Aufgrund der ursprünglichen Pläne der Kanadier wurde der FRM II ohne eine entsprechende Bestrahlungsanlage gebaut, obwohl diese ursprünglich vorgesehen war. „Das war meine größte Fehlentscheidung“, bedauert Winfried Petry, der das Projekt am FRM II nun aber mit großem Eifer vorantreibt. Wenn alles gut geht, könnte der FRM II ab 2018 bis zu 50 Prozent des europäischen Bedarfs an Mo-99 liefern.

Maike Pfalz