

## Kernfusion als mögliche Alternative zu konventionellen Energieerzeugungstechnologien

# Optimale Beschichtungen für harsches Klima

**Seit rund 50 Jahren arbeitet die internationale Forschergemeinschaft an der Entwicklung eines Fusionsreaktor-konzepts, das für eine Stromerzeugung umgesetzt werden kann. Die Leistungsfähigkeit der Fusion hat sich so weit erhöht, dass mit dem Bau eines grossmasstäblichen Experimental-Fusionsreaktors begonnen werden konnte.**

Im Fusionsreaktor ist das Klima rau. Neutronen- und Ionenstrahlung sowie hohe Plasmatemperaturen stellen enorme Anforderungen an die Materialien. An der Universität Basel werden neuartige Beschichtungen entwickelt, damit die Primärspiegel ihre Aufgabe beim Anfahren und Betrieb des Fusionsreaktors erfüllen können: Sie müssen das Licht

den beiden Wasserstoff-Isotopen. Während des Betriebs muss vor allem verhindert werden, dass das heisse Fusionsplasma aus seinem «Magnetkäfig» ausbricht und die Wände berührt, da in diesem Fall Partikel aus der Wand verdampfen würden. Solche Verunreinigungen kühlen das Plasma sofort ab und die Fusion kommt zum Erliegen. Sowohl der Anfahrprozess

geleitet. ITER wird der letzte Forschungsreaktor sein, bevor dann mit dem noch grösseren «Demo» die wirtschaftliche Energieerzeugung demonstriert werden soll. Sieben Partner, die USA, Russland, China, Indien, Japan, Korea und die Europäische Union, arbeiten an diesem Vorhaben. Die Schweiz ist dank ihrer Kooperation beim europäischen Energieprogramm Euratom eine voll berechnete Partnerin bei diesem Grossprojekt. Unterstützung erhalten die Forschenden durch den Bund, durch das Staatssekretariat für Bildung und Forschung (SBF) sowie das Bundesamt für Energie (BFE). Neben dem Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) der ETH Lausanne, dem Schweizer Kompetenzzentrum für Plasmaphysik, ist seit Langem auch die Universität Basel mit Forschungsarbeiten des Teams um den Physiker Dr. Laurent Marot am Lehrstuhl von Prof. Ernst Meyer im Bereich von Materialbeschichtungen tätig.

### Chancen und Gefahren

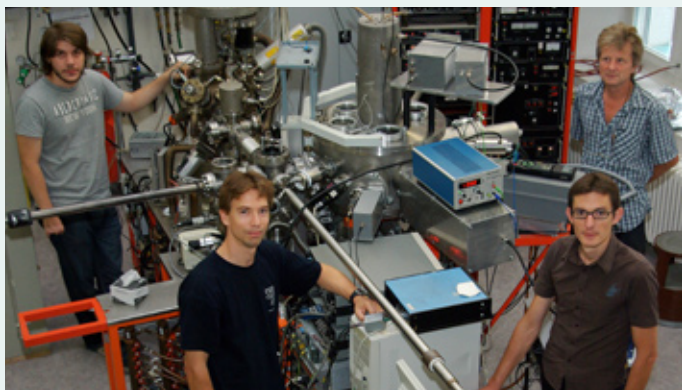
Laurent Marot: «Im Gegensatz zu den weltweit im Einsatz stehenden Kernkraftwerken arbeitet ein Fusionsreaktor mit anderen und geringeren Mengen an Brennstoffen. Die Gefahr einer unkontrollierten Kettenreaktion besteht nicht, da das Fusionsplasma nur bei genau den eingestellten Bedingungen weiter brennen kann. Ansonsten erlöscht es sofort. Die Halbwertszeiten der bei der Fusion anfallenden radioaktiven Abfälle sind im Vergleich zu Uranium und Plutonium sehr klein. Somit sind die Abfälle nach wenigen Generationen ungefährlich und benötigen kein Endlager. Sowohl die

Betriebssicherheit als auch die langfristige Versorgung mit Brennstoffen sind wesentliche Pluspunkte. Neben den grossen technologischen Herausforderungen bei der Entwicklung und der Realisierung des ITER geben auch die Prozessstabilität sowie die interne Erzeugung von Tritium in der Fachwelt immer wieder zu Diskussionen Anlass. Während Deuterium aus Meerwasser gewonnen werden kann – also kaum limitiert ist – ist Tritium durch den aus dem Plasma erfolgenden Neutronenbeschuss aus den im Reaktor eingebauten Lithium-Modulen zu erzeugen.» Ist dieser Vorgang Gegenstand ihrer Forschungsarbeiten? Laurent Marot: «Nur indirekt, denn wir arbeiten zurzeit vor allem an den Primärspiegeln, die sich in der Vakuumkammer befinden und dazu dienen, die optische Überwachung und Messung des Plasmazustandes durchzuführen. Im Rahmen der Forschungskooperation mit der ETH Lausanne und anderen Instituten, welche an Themen zur Fusionsreaktion arbeiten, sind wir natürlich im gesamten Entwicklungsprozess hin zum ITER und danach zum Demoreaktor eingebunden. Auf den Spiegeln liegt aber unser eigentlicher Fokus.»

Marco Wisse, wissenschaftlicher Assistent, Postdoc: «Durch die Platzierung im Innern des Tokamak werden die wassergekühlten Spiegel bei Temperaturen über 100°C den Plasmapartikeln, der Neutronenstrahlung und Staub ausgesetzt. Damit werden an die Oberflächen extreme Anforderungen gestellt, die wir durch besondere Materialien und Oberflächenstrukturen erfüllen wollen.»

### Mess- und Diagnostik-Systeme

Die ringförmige Vakuumkammer des ITER, Tokamak genannt, wird mit rund 50 unterschiedlichen Mess- und Diagnostik-Systemen



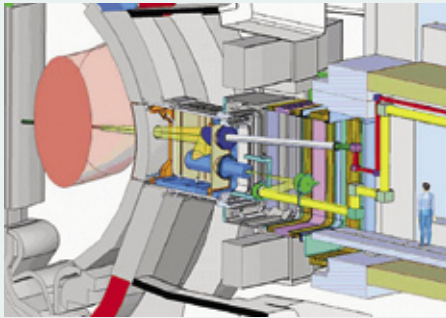
Das Forscherteam der Universität Basel (v.l.n.r.): Baran Eren, Marco Wisse, Laurent Marot und Roland Steiner. (Foto: Jürg Wellstein)

aus der Vakuumkammer über weitere Spiegel zur installierten Diagnostik und Messtechnik leiten, denn durch den intensiven Neutronenbeschuss kann kein direkter Sichtkontakt gegeben werden.

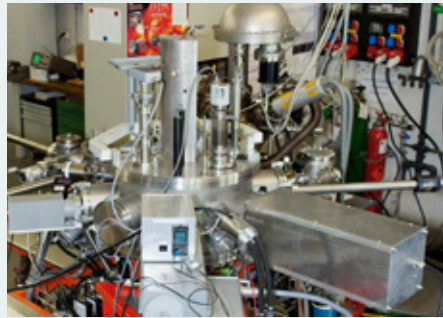
### Ein internationales Grossprojekt

Als erster Schritt zum Start der Fusionsreaktion müssen Luft und Verunreinigungen aus der Vakuumkammer entfernt werden. Danach schaltet man die leistungsstarken Magnete ein und lässt den gasförmigen Brennstoff ein. Nun wird in der Kammer eine elektrische Spannung angelegt, sodass das Gas ionisiert und ein Plasma bildet. Dieses Plasma schafft dann die Grundlage für die Fusion von Deuterium und Tritium, also

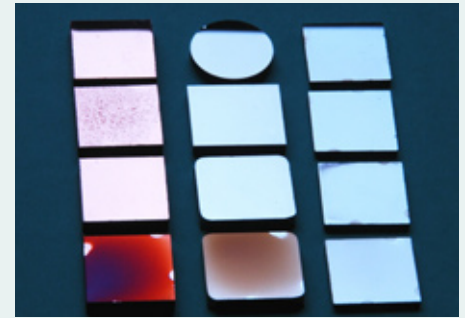
als auch der nachfolgende Betrieb des Fusionsreaktors werden nur machbar sein, falls geeignete Messeinrichtungen zur Verfügung stehen. Für die vielfältigen optischen Messungen sind gut funktionierende Primärspiegel, wie sie zurzeit an verschiedenen Forschungsinstituten, so auch am Physik-Departement der Universität Basel, entwickelt werden, grundlegende Voraussetzung. Damit liegt ein wesentlicher Schlüssel für das Gelingen des im Bau befindlichen Experimental-Fusionsreaktors ITER offensichtlich bei diesen Forschungsgruppen. Mit dem Bau des ersten internationalen Experimentalreaktors und seiner umfangreichen Infrastruktur wird im südfranzösischen Cadarache eine neue Phase ein-



Primärspiegel stellen die erste Station der Lichtwellen dar, welche im ITER für Diagnose und Messungen verwendet werden. (Bild: ITER)



Die Vakuummesskammer für das Plasma-Sputtering wurde mit einer Diagnosekammer erweitert, sodass während des Prozesses Messungen an den erzeugten Oberflächen gemacht werden können. (Foto: Uni Basel)



Die kleinformigen Spiegelproben sind nach der Exposition im Plasma teilweise mit Staub bedeckt. (Foto: Uni Basel)

ausgestattet, um das dort gebildete Plasma zu steuern, zu kontrollieren und zu optimieren. Gemessen werden Temperatur, Dichte, Helium-Menge, Verunreinigungen usw. Der Ausgangspunkt ist das gesamte sichtbare und auch Teile des unsichtbaren Lichtspektrums. Eingesetzt wird die komplette Bandbreite an bekannten Instrumenten wie Lasern, Röntgengeräten, Spektrometern und Strahlungsmessgeräten. Zudem gibt es noch Neutronenkameras, Partikel-Monitore, Druck- und Gas-Analysegeräte. Über Spiegel lassen sich die Lichtwellen den einzelnen Systemen zuführen. Kann der Primärspiegel keine einwandfreie Funktion mehr gewährleisten, so werden Messwerte verfälscht und die Steuerung der Fusionsreaktion evtl. beeinträchtigt oder sogar verunmöglicht.

## Arbeit an der Uni Basel

Baran Eren, Doktorand: «Wir konzentrieren uns auf die Untersuchung der Erosions- und Ablagerungsmechanismen, welche die optische Reflexion von potenziellen Materialien beeinflussen. Dabei sind Stoffe mit einer hohen Dichte gefragt, wie Molybdän und Rhodium, welche auf ein Basismetall aufgebracht werden können.» Laurent Marot: «Wir arbeiten sowohl an mono- als auch polykristallinen Materialien und nutzen die seit Langem vorhandenen Kompetenzen unseres Instituts im Bereich der Nanokristalle. Denn sind die Kristallite kleiner als die auftreffende Wellenlänge, so werden durch Ionenätzen und Neutronenbeschuss die Spiegeleigenschaften weniger stark verändert.» Baran Eren: «Wird diese Schicht rau, so beeinträchtigt dies

die Reflexion der nutzbaren, kurzwelligeren Strahlung, welche zur Messung der verschiedenen Parameter genutzt wird. Im ITER sollen diese Primärspiegel einen Durchmesser von ca. 40 cm und eine Dicke von 4 bis 5 cm aufweisen. Im Labor setzen wir heute als Prüflinge zum Teil beschichtete Proben mit einem Durchmesser von bis zu 3 cm ein.»

Roland Steiner, Ingenieur und wissenschaftlicher Mitarbeiter: «In der Plasma-Abscheidungskammer erfolgt die Oberflächenbeschichtung mit den gewünschten Materialien. Dazu nutzen wir das Magnetronputtern, also die Kathodenzerstäubung im Vakuum, bei welcher durch Beschuss mit energiereichen Ionen einzelne Atome aus einem Festkörper herausgelöst werden, in die Gasphase übergehen und sich auf der Gegenseite als Schicht ablagern. Diese Sputterdeposition stellt also eine Beschichtungstechnik dar, mit welcher wir gezielte Materialeigenschaften erzeugen. Um die Proben untersuchen zu können, ohne dass sie das Vakuum verlassen müssen, haben wir eine Direktverbindung in eine zweite Kammer geschaffen, wo die Messinstrumente (z. B. Fotoelektronenspektrometer) eingesetzt werden.»

Laurent Marot: «Zum Teil senden wir beschichtete Proben danach zur Bestrahlung an den europäischen Fusionsreaktor JET bei Oxford, zum TEX-TOR des Forschungszentrums in Jülich (D) oder in die USA. Die Proben werden anschliessend bei uns ausgemessen und analysiert. Auch in Basel können wir Ionenbestrahlungen durchführen. Mit einer eigens dafür gebauten Plasmaquelle wird der Ionenbeschuss

nachgeahmt. Häufig muss aber mit Modellen gearbeitet werden. Beispielsweise sind wir hier nicht dafür eingerichtet, mit giftigem Berilium-Staub belastete Proben zu handhaben und zu testen. ITER soll in einer ersten Phase, wie heute schon JET, mit einer Berilium-Beschichtung ausgeführt und betrieben werden. Als Modellelement dient uns aber hierfür Aluminium, das sich physikalisch und chemisch sehr ähnlich verhält. Geplant sind ca. 80 Primärspiegel im Innern des Tokamak beim ITER, mit welchen die gesamte Diagnostik arbeiten soll. Wir stehen auch in engem Kontakt mit den für den Bau der Diagnostikelemente beauftragten Labors bzw. dem dafür verantwortlichen Konsortium.»

Marco Wisse: «Neben der Strukturveränderung und Erosion durch die Bestrahlung ist auch der Staub ein ernst zu nehmendes Problem. Ein wirtschaftlich arbeitender Reaktor muss einen kontinuierlichen Betrieb gewährleisten. Bei der favorisierten Methode sollen die Spiegel ohne Ausbau mit Laserstrahlen im Vakuum gereinigt werden. Im Moment testen wir dieses Verfahren unter atmosphärischen Bedingungen und definieren Wellenlängen, Leistungen usw.»

## Zukunft der Fusionsforschung

Die technologischen und organisatorischen Anforderungen zum Bau des ITER sind enorm. Es sind umfangreiche Ressourcen und Finanzen nötig. Weltweit sind Forschung und Industrien daran, Lösungen zu finden und konkrete Elemente zu bauen. Wer behält schliesslich recht: die Kritiker oder die Optimisten? Hätten die

Forschungsarbeiten, wie sie an der Universität in Basel und am CRPP in Lausanne durchgeführt werden, auch einen Zweck gehabt, falls ITER zeigt, dass das Ziel einer kommerziellen Fusionsenergienutzung noch immer nicht erreichbar ist?

Neben der Grundlagenforschung im Bereich der Beschichtungstechnologie, wie sie vom Team um Laurent Marot durchgeführt wird, sind damit auch Ausbildungsmöglichkeiten für Physiker und Wissenschaftler verbunden. Die bisherigen Arbeiten zeugen darüber hinaus von einer Vielfalt an Nutzungsoptionen. Dieses Know-how wurde beispielsweise vom früheren Leiter der Gruppe Nanostrukturen und Composites, Prof. Dr. Peter Oelhafen, auch für die Entwicklung von Sonnenschutzgläsern und thermischen Sonnenkollektoren eingesetzt. Solche Produkte sind heute auf dem Markt und tragen zur Einsparung bzw. Gewinnung von Energie bei. Vakuumbeschichtungen, wie Magnetronputtern, sind heute in der Industrie weitverbreitete Methoden zur Veredelung von Produkten. Dünnschichttechnologie und nanostrukturierte Beschichtungen stellen für die Lösung zahlreicher technologischer Problemstellungen eine wichtige Option dar. (bf)

### Infos

Universität Basel, 4056 Basel  
laurent.marot@unibas.ch

Experimental-Fusionsreaktor  
ITER, [www.iter.org](http://www.iter.org)

Forschungsprogramm  
Kernfusion, 3003 Bern  
claude.vaucher@sbf.admin.ch

[www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)