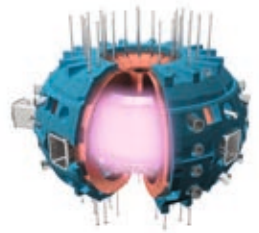
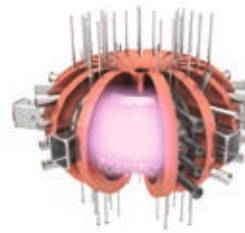
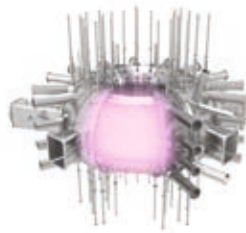
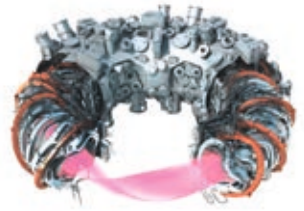


Industriekooperation in der Fusion



Wendelstein 7-X

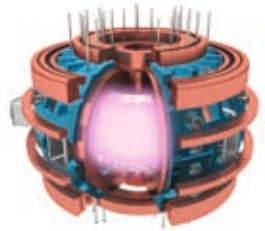


Hightech für Fusionsanlagen

Wie profitieren Industrieunternehmen von Aufträgen für die Fusionsforschung?



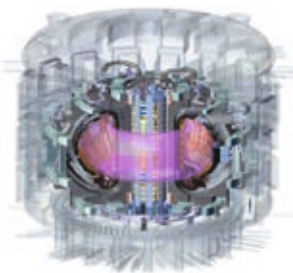
In einer Welt mit stetig wachsender Bevölkerung und steigendem Lebensstandard stehen wir vor globalen Herausforderungen, die sich zwangsläufig auf viele Lebensbereiche auswirken werden. Eine davon ist der weiter zunehmende Bedarf an Energie. Der Stromverbrauch wird sich bis zum Jahr 2100 versechsfacht haben. Darauf weisen die meisten Studien hin. Gleichzeitig soll die Energieversorgung sicher, verfügbar, bezahlbar, umweltfreundlich und nachhaltig sein. Fusionskraftwerke könnten hierzu als Ergänzung zu den erneuerbaren Energien in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einen wesentlichen Beitrag leisten.



ASDEX Upgrade

Ziel der weltweiten Forschungsarbeiten ist ein Kraftwerk, das Energie aus der Verschmelzung von leichten Atomkernen gewinnt. Dafür muss der Brennstoff – ein dünnes, elektrisch geladenes Wasserstoffgas, ein Plasma – in einem Magnetfeldkäfig eingeschlossen werden. Dieses Plasma muss auf Zündtemperaturen über 100 Millionen Grad Celsius aufgeheizt und die Reaktion stabil aufrechterhalten werden.

Deutschland nimmt in der Fusionsforschung und -technologie eine internationale Spitzenposition ein. Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching und Greifswald (IPP) sowie die Helmholtz-Zentren Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und Forschungszentrum Jülich treiben die Entwicklung eines Fusionskraftwerks voran. Alle Arbeiten werden im Rahmen eines arbeitsteiligen und abgestimmten gemeinsamen Programms durchgeführt und sind eingebettet in das Europäische Fusionsprogramm.

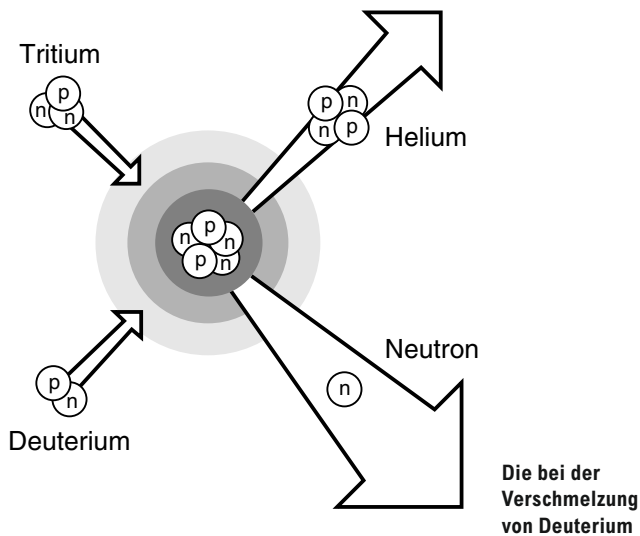


ITER

Einen großen Teil der wissenschaftlichen Ausrüstung, die an den drei Zentren zum Einsatz kommt, liefert die Industrie. Viele Komponenten lassen sich jedoch nicht einfach aus einem Katalog ordern. Sie müssen von den Industriepartnern erst entwickelt werden. Nicht selten bewegen sich die benötigten High-Tech-Ausrüstungen dabei am Rande des technologisch Machbaren. Das treibt die Unternehmen zu technologischen Spitzenleistungen und trägt nebenbei auch zur Ausbildung des Personals in der Industrie bei. Zudem verbessern die gewonnenen Kenntnisse oft die Leistungsfähigkeit der Industriepartner in ihren Kerngeschäften oder eröffnen ihnen sogar neue Geschäftszweige. Die für diese Broschüre gesammelten Beispiele aus dem IPP, KIT und Forschungszentrum Jülich zeigen: Von den Aufträgen aus der Fusionsforschung profitieren die Unternehmen nicht nur unmittelbar. Sie können durch die neu erworbenen Kompetenzen auch ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern.

Eine europäische Strategie für die Fusion

Fusion treibt Sonne und Sterne an. In ihnen verschmelzen Wasserstoffkerne unter dem extremen Druck der Schwerkraft. Unter irdischen Bedingungen verschmelzen die beiden Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium am leichtesten. Dabei entsteht ein Heliumkern, außerdem wird ein Neutron frei sowie große Mengen nutzbarer Energie: Ein Gramm Brennstoff könnte in einem Fusionskraftwerk so viel Energie erzeugen, wie bei der Verbrennung von 11 Tonnen Kohle entsteht.



Die bei der Verschmelzung von Deuterium und Tritium entstehenden Neutronen treffen im Kraftwerk auf das Blanket – ein das Plasmagefäß umgebenden Mantel. Dort wird ihre Bewegungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt. Ein Kühlmittel transportiert die Wärmeenergie über Wärmetauscher zu Turbine und Generator, wo sie in elektrische Energie umgewandelt wird.

Die europäischen Fusionsforschungseinrichtungen sind im Konsortium EUROfusion organisiert. Das wissenschaftliche Programm des Konsortiums basiert auf einer Roadmap. Diese beschreibt die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die erforderlich sind, um die Grundlage für ein stromerzeugendes Fusionskraftwerk in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu schaffen.

In Europa konzentriert sich der Weg zu einem Fusionskraftwerk auf die Nutzung magnetisch eingeschlossener Plasmen bei Temperaturen von über 100 Millionen Grad Celsius bei einer ausreichend langen Einschlussdauer. Zwei Konzepte kommen dafür in Frage: der Tokamak und der Stellarator.

Die wichtigste Forschungsinfrastruktur auf dem Weg zum Fusionskraftwerk ist ITER. Diese Anlage vom Typ Tokamak entsteht in internationaler Zusammenarbeit in Südfrankreich und soll die wissenschaftliche und technologische Machbarkeit der Kernfusion auf der Erde demonstrieren. An ITER soll durch die Fusion von Deuterium und Tritium zum ersten Mal eine Fusionsleistung von bis zu 500 Millionen Watt für 400 Sekunden erzeugt werden. Neben den großen Fusionsanlagen JET (Großbritannien) und JT-60SA (Japan) spielen kleine und mittelgroße Tokamaks – darunter ASDEX Upgrade im IPP Garching – eine wichtige Rolle bei der Behandlung von spezifischen Themen für die Entwicklung und den Betrieb von ITER.

ASDEX Upgrade



Foto: IPP, Bernhard Ludewig

In der europäischen Roadmap stellt die Stellarator-Linie eine langfristige Alternativ- bzw. Backup-Strategie für den Tokamak dar. Wendelstein 7-X – im IPP Greifswald – ist die weltweit größte Anlage vom Typ Stellarator. Ihre Aufgabe ist es, die Kraftwerkseignung dieses Bautyps zu untersuchen. Zudem wird Wendelstein 7-X ebenfalls zur Entwicklung der Physik und Technologie von ITER beitragen.

Parallel zum Aufbau von ITER ist die Konzeptentwicklung des europäischen Demonstrations-Fusionskraftwerks DEMO bereits im Gange. Der Hochleistungsbetrieb an ITER wird dann wichtige Erkenntnisse für die endgültige Festlegung des DEMO-Entwurfs liefern. DEMO soll über Fusion erzeugten Strom in der Größenordnung von mehreren Hundert Megawatt in das Netz einspeisen und mit einem geschlossenen Brennstoffkreislauf arbeiten.

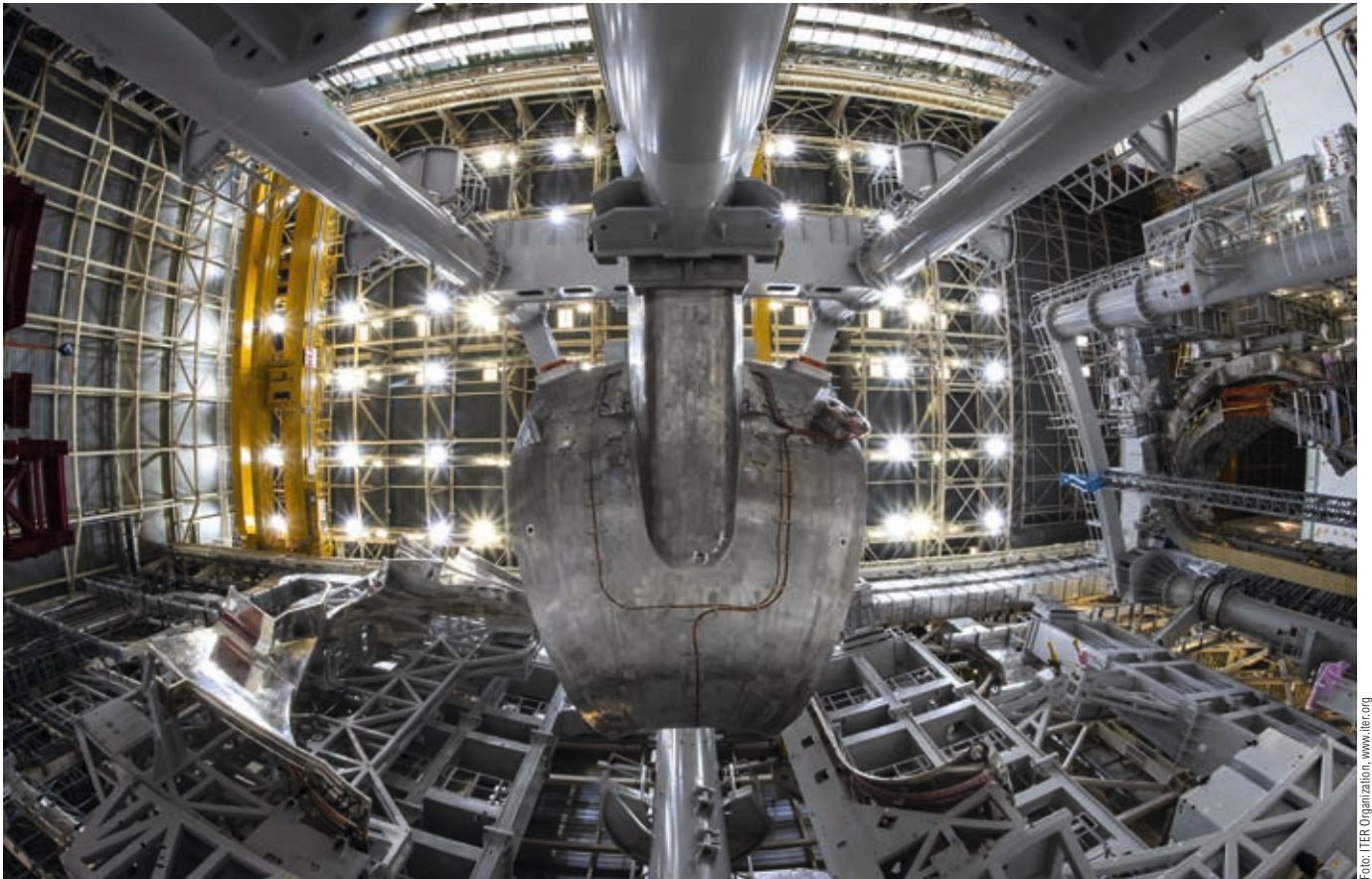


Foto: ITER Organization, www.iter.org

ITER-Montage: in der Bildmitte ein 440 Tonnen schwerer Sektor des Vakuumgefäßes

Plasmagefäß von Wendelstein 7-X



Fotos: IPP, Jan Michael Hosan

MAN Energy Solutions SE, Deggendorf, Deutschland

„Die Mona Lisa der Schweißkunst“ * Das Plasmagefäß des Wendelstein 7-X

*Der Spiegel 1/2009



Schweißarbeiten am Plasmagefäß von Wendelstein 7-X

Foto: P.P. Wolfgang Filser

Das wie ein gewundener Schlauch geformte Plasmagefäß des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X beherbergt ein etwa 100 Millionen Grad heißes Wasserstoffplasma. Die annähernd ringförmige Kammer hat einen Außendurchmesser von 12,8 und eine Höhe von 2,5 Metern. Da das Plasma unmittelbar der Geometrie des Magnetfeldes folgt, muss auch das Stahlgefäß exakt der Form des Magnetfeldes entsprechen. Die daraus resultierenden Ansprüche an den Stahlgefäßbau waren für MAN Energy Solutions neu: In ungewöhnlich komplexer 3D-Form sollte ein 30 Kubikmeter-Gefäß aus 17 Millimeter dickem Edelstahl gefertigt werden – mit einer generellen Maßhaltigkeit von nur plus/minus zwei Millimetern!

Die Plasmakammer besteht aus 200 Ringen. Diese sind aus 15 Zentimeter breiten Stahlblechstreifen zusammengesetzt, die – vielfach geknickt – die geforderte geschwungene Kontur nachformen. Ultrahochvakuumdicht verschweißt wurden 20 Sektoren ausgeliefert, die – vor Ort verschweißt – schließlich den geschlossenen Ring der Kammer ergaben. Die Gefäßwand enthält zudem rund 300 verschieden große Öffnungen, über die sich das Plasma technisch versorgen und wissenschaftlich beobachten lässt.

Für diese Arbeiten hat MAN am Standort Deggendorf eine ganze Reihe neuer Verfahren eingeführt:

- ▶ Der Fertigung eines so komplexen Gefäßes ging eine detaillierte Modellierung am Computer voraus. Den Auftrag nahm MAN Energy Solutions zum Anlass, das modernste verfügbare Design-Programm für dreidimensionale Konstruktion einzuführen. Räumliche Konstruktion gehört seither zum Unternehmens-Knowhow.
- ▶ Die Maßhaltigkeit des Gefäßes musste höchsten Ansprüchen genügen. Um dessen Form überprüfen und nachweisen zu können, hat MAN Energy Solutions in Deggendorf erstmals ein elektronisches, lasergestütztes Vermessungssystem verwendet. Es befindet sich bei Serienprodukten inzwischen im Routineeinsatz.

Von all diesen Weiterentwicklungen im Stahlbau hat MAN Energy Solutions direkt oder indirekt als Unternehmen profitiert. Neue Techniken wurden eingeführt und mit dem IPP als Auftraggeber verfeinert. Sie sind in die Serienproduktion petrochemischer und chemischer Reaktoren bei MAN eingeflossen. Bereits hochqualifizierte Fachkräfte konnten ihre Kompetenz erweitern und bauen nun für den internationalen Fusionstestreaktor ITER die größte jemals gefertigte Edelstahl-Hochvakuumkammer zusammen. Angesichts seiner nachgewiesenen Expertise in komplexer Edelstahlverarbeitung und innovativer Schweißtechnologie erhielt das Unternehmen zudem den Zuschlag, für ITER Stützen sowie Stützenverlängerungen zu liefern. Über diese an den Öffnungen sitzenden Stützen ist die Plasmakammer für Fernbedienvorgänge und andere Systeme wie Diagnose-, Heiz- und Vakuumsysteme zugänglich.



Foto: ITER

Beim Zusammenbau des ITER-Kryostaten – hier der „Upper Cylinder“ – stellen die Deggendorfer ihr Knowhow in komplexer Edelstahlverarbeitung erneut unter Beweis.



Foto: MAN Energy Solutions

Zugangsstützen für den internationalen Experimentalreaktor ITER

► Die gewählte Technik, das Gefäß aus einzelnen Stahlstreifen aufzubauen, die zuvor aus vorgeformten Segmenten gefertigt wurden, ist äußerst innovativ, setzt aber höchst entwickelte Schweißtechnologien voraus, um den Schweißverzug unter Kontrolle zu halten. Diese Technologien wurden hier spektakulär auf die Probe gestellt.

► Für den Einbau der Wandelemente im Plasmagefäß waren Stahlkonsolen erforderlich, die äußerst präzise positioniert werden mussten. Das Unternehmen hat sich hierfür einen Sechs-Achsen-Handhabungs-Roboter angeschafft, den es seither standardmäßig nutzt. Um die 300 Öffnungen präzise herausarbeiten zu können, hat es sich ferner das dreidimensionale Wasserstrahlschneiden zugänglich gemacht.

Die 70 Magnete des Wendelstein 7-X werden mit flüssigem Helium auf -270 Grad Celsius abgekühlt. Sie kommen in den supraleitenden Zustand und verbrauchen nach dem Einschalten kaum Energie. Das Plasmagefäß, das Außengefäß und alle 254 Stützen-Rohre, über die das Maschineninnere erreichbar ist, sind mit einer thermischen Isolation versehen. Dabei handelt es sich um eine geknitterte, mehrlagige, aluminiumbeschichtete Kunststofffolie, die mit einer aktiv gekühlten Hülle bedeckt ist. Das war eine herausfordernde, vorher noch nie bewältigte technische Aufgabe, die MAN Energy Solutions und das IPP gemeinsam gelöst haben.

„Verpacken Sie mal einen Igel!“ Die thermische Isolation des Wendelstein 7-X

Diese Schritte bei der Fertigung der thermischen Isolation ragen heraus:

- ▶ Zur thermischen Isolation des Plasmagefäßes fertigte man aktiv gekühlte Abdeckelemente, sogenannte Schilde. Wegen der unkonventionellen Gestalt des Gefäßes und des extrem engen Bauraums musste deren Formgenauigkeit allerhöchsten Ansprüchen genügen. Versuche mit Stahl, Messing und Kupfer schlugen fehl, trotz weit fortgeschrittener Formtechnik. Die Lösung bestand in Schilden aus glasfaserverstärktem Kunststoff.
- ▶ Diese Kunststoffschilde waren nicht nur exakt in exotische Formen zu bringen, sie sollten zudem Wärme leiten können. Ein gemeinsam patentiertes Verfahren basiert auf laminierten Kupfergittern. Damit konnte ein gut wärmeleitender Verbundwerkstoff für Anwendungen bei tiefsten Temperaturen entwickelt werden.
- ▶ Die Montage der thermischen Isolation durch MAN Energy Solutions war für das Unternehmen ein Wagnis. Es handelte sich nicht um eine Baustelle wie jede andere, sondern um ein komplexes, wissenschaftlich geprägtes Umfeld, in dem auf Überraschungen und Änderungen, wie sie für eine erstmalig realisierte Anlage typisch sind, rasch und angemessen reagiert werden musste.



Foto: IPP, Wolfgang Filser

Innen- und Außenansicht des Plasmagefäßes von Wendelstein 7-X



Foto: IPP, Beate Kemnitz

MAN Energy Solutions SE hat sich durch den Auftrag für die thermische Isolation ein neues Betätigungsfeld in einem Hochtechnologiebereich erschlossen. Unterstützt durch einen Fachberater der Linde AG arbeitete sich MAN in dieses Gebiet ein. Neben Fusionsanlagen benötigen auch Hochenergiebeschleuniger Kryotechnik, etwa das internationale Beschleunigerzentrum FAIR, das derzeit in Darmstadt entsteht.

Foto: IPP, Anja Richter-Ullmann



Montage der thermischen Isolation des Außengefäßes von Wendelstein 7-X

**Thales Electron Devices S.A.,
Paris-Velizy, Frankreich
Reinhold Mühleisen GmbH,
Gerlingen, Deutschland
Element Six Ltd.,
London, Großbritannien
Diamond Materials GmbH,
Freiburg, Deutschland
Reuter Technologie GmbH,
Alzenau/Schöllkrippen, Deutschland**

Effiziente Mikrowellenheizung mit Leistungen im Megawattbereich

Für das Anfachen der Fusionsreaktion muss das Plasma auf Temperaturen von über 100 Millionen Grad Celsius aufgeheizt werden. Eine Möglichkeit hierfür ist die Heizung mittels Mikrowellen. Ähnlich wie bei der Mikrowelle, die jeder aus dem Haushalt kennt, nutzt man dabei leistungsfähige Vakuumröhren als Mikrowellenquellen. Bei der Haushaltsmikrowelle ist dies das Magnetron, das bei einer Frequenz von 2,45 Gigahertz Ausgangsleistungen von bis zu einem Kilowatt liefert. Die weltweit leistungsstärksten Vakuumröhren finden sich in der Fusionsforschung: Bei einer Betriebsfrequenz von 100 bis über 200 Gigahertz müssen Ausgangsleistungen von mindestens einer Million Watt (einem Megawatt) erzeugt werden. Das geschieht mit sogenannten Gyrotrons, die bei Wendelstein 7-X bis zu 30 Minuten lang ihre volle Leistung liefern.

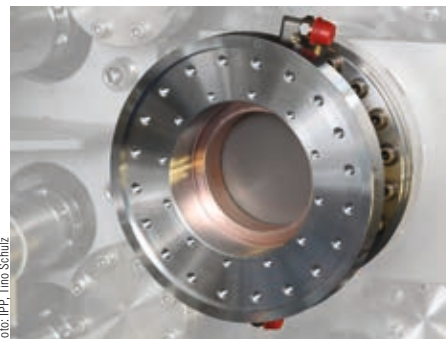
Für die Entwicklung dieser Gyrotrons, die von der Firma Thales Electron Devices gebaut werden, arbeiten Thales, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und das IPP eng zusammen. Partner bei der Herstellung von hochpräzisen Bauteilen sind die Reinhold Mühleisen GmbH, die hochpräzise Modenwandler und Spiegelsysteme für Gyrotrons liefert, die Firmen Element Six Ltd. und Diamond Materials GmbH, Spezialisten für die Diamantscheiben der Mikrowellenfenster, sowie die Reuter Technologie GmbH, die Knowhow zur Löttechnik zwischen Diamant und Kupfer beisteuert. Insgesamt zehn Gyrotrons wurden inzwischen an das IPP in Greifswald ausgeliefert. Ein leistungsgesteigertes Gyrotron mit bis zu 1,5 Megawatt Ausgangsleistung ist in Entwicklung. Die von Thales industriell gefertigte Prototyp-Röhre wurde am KIT getestet und 2022 an das IPP ausgeliefert.



Hochleistungsmikrowellenröhre für den Dauerbetrieb



Foto: IPP, Wolfgang Fliser



Verlötete CVD-Diamantscheibe in einem Torus-Diamantfenster

Dank dieser Zusammenarbeit von Forschung und Industrie konnten inzwischen Gyrotrons für weitere Plasmaexperimente entwickelt werden – direkte Ableitungen aus der Konstruktion für Wendelstein 7-X. Dazu gehört das in Kooperation von KIT und dem Swiss Plasma Center entwickelte Zweifrequenz-Gyrotron für den Schweizer Tokamak à Configuration Variable (TCV). Dieses Gyrotron kann bei einem Megawatt Ausgangsleistung alternativ auf einer Frequenz von 84 oder 126 Gigahertz betrieben werden. Und dazu gehört auch der im finalen Test befindliche industrielle Prototyp für ITER, der in einer Kooperation von europäischen Forschungsinstituten und der EU-Organisation „F4E – Fusion for Energy“ entwickelt wurde. Die bei den Röhren für Wendelstein 7-X und ITER gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in die Entwicklung der Gyrotrons für das zukünftige Demonstrationskraftwerk DEMO ein. Mindestens zwei Megawatt Ausgangsleistung bei Frequenzen von über 200 Gigahertz sollen damit erzielt werden.



Foto: PPR-Jan Schöler

140 Metallspiegel übertragen die Mikrowellen von den bisher zehn Gyrotrons zum Wendelstein 7-X-Plasma

Diamanten als Fenster zum Plasma

Ein kritisches Bauteil eines Gyrotrons ist das Fenster zwischen der Röhre und der Außenwelt sowie zwischen der Strahlführung und dem Plasma. Um die Wärmeverluste im Fenster relativ niedrig zu halten, wurden diese aus künstlichen Diamanten mit hoher Reinheit hergestellt. Die Diamantscheiben, die in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie von den Firmen Diamond Materials und Element Six in einem weiterentwickelten Verfahren der Gasphasenabscheidung (CVD) gefertigt wurden, sind mit einem Durchmesser von bis zu 120 Millimetern und einer Dicke von 1,8 Millimetern im Einsatz und hervorragend für Anwendungen in der Millimeterwellenheizung geeignet.

Neueste Entwicklungen von CVD-Diamantfenstern betreffen die Transmission von Millimeter-Wellen unterschiedlicher Frequenzen durch ein sogenanntes Brewster-Fenster. Indem man verschiedene Frequenzen verwendet, kann der Ort, an dem Plasmainstabilitäten auftreten und durch Energieeinstrahlung

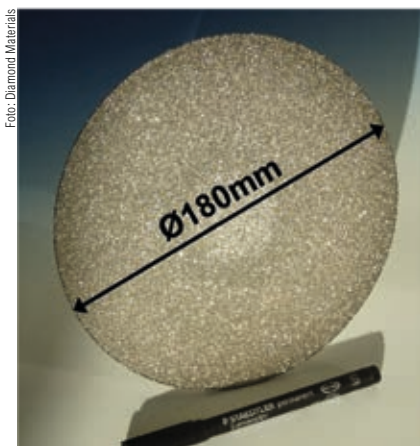
aufgelöst werden sollen, besser erreicht werden. Zukünftige Fusionsanlagen werden solche Mehrfrequenz-Gyrotron-Systeme daher standardmäßig einsetzen.

Eine zwei Millimeter dicke Diamantscheibe wird schräg in eine Wellenleiterstruktur eingebaut. Die Neigung der Scheibenachse beträgt dabei 67,2 Grad: der Brewster-Winkel von Diamant. Reflexionen von Millimeter-Wellen können somit vermieden werden. Zur Realisierung eines Wellenleiterdurchmessers von 63,5 Millimetern werden Diamantscheiben von 180 Millimetern Durchmesser benötigt – eine Größe, die bislang nicht verfügbar war. Das Karlsruher Institut für Technologie meisterte in Kooperation mit Diamond Materials die Herausforderung, Diamantscheiben dieser Größe mit guten Mikrowelleneigenschaften herzustellen.

Die Diamantfenster benötigen eine zuverlässige Kühlung. Die Kühlung mit Wasser birgt die Gefahr von Korrosion in der metallischen Halterung, daher wurde in dieser Entwicklung erstmals erfolgreich Silikon-Öl als Kühlmittel eingesetzt. Zudem hat die Firma Reuter Technologie in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie in einer mehrjährigen Kooperation profundes Wissen in der Löttechnik zwischen Diamant und Kupfer mit speziellen Kupfer-Silber-Titan-Loten aufgebaut. Auch Diamond Materials in Freiburg lötet nun erfolgreich Diamantscheiben in Kupferstrukturen ein. Diese Lötung bietet die Grundlage zum Aufbau eines Diamantfensters, das nach einem weiteren Lötsschritt von einem Edelstahlgehäuse umgeben und in eine Standard-Millimeterwellen-Übertragungsleitung eingebaut ist. Bei der Herstellung der Diamantfenster mit der integrierten Kühlung lag eine besondere Herausforderung in der Lötung der unterschiedlichen Werkstoffe bei gleichzeitig geforderter Hochvakuumfestigkeit.

Aktuell wird daran gearbeitet, ein 1,5 Megawatt-Gyrotron für den Dauerbetrieb an Wendelstein 7-X zu entwickeln, sowie die Übertragungsleitungen für den Ausbau von inzwischen zehn auf dann zwölf Röhren zu ertüchtigen. Teil dieser Maßnahme zur Erweiterung der Heizleistung an Wendelstein 7-X ist ein erneuter Industrieauftrag an den Hersteller der Mikrowellenröhren, Thales Electron Devices, zum Bau eines 1,5 Megawatt-Prototyp-Gyrotrons. Die Auslegung dieses Gyrotrons basiert auf der Konstruktion des erfolgreich eingesetzten Wendelstein 7-X-Gyrotrons, das auch die Basis für das europäische Gyrotron für den internationalen Experimentalreaktor ITER bildet.

Alle diese Verbesserungen im Konzept und im technischen Detail ebnen neue Wege für Hochleistungsmikrowellenröhren, wie sie in der Kommunikationstechnik, in der Materialbearbeitung sowie für das Fusionsexperiment ITER und das erste Fusionskraftwerk DEMO notwendig sind. Thales Electron Devices als Hauptauftragnehmer hat sich im Rahmen dieser Aufträge in einem hohen Umfang Wissen erarbeitet, das zuvor nicht vorhanden war und ist jetzt deutlich besser am Markt platziert. Die Firmen Diamond Materials und Reuter Technologie haben sich mit ihrem speziellen Knowhow für künftige Aufträge ebenfalls deutlich besser aufgestellt.



CVD-Diamantscheibe der Diamond Materials GmbH mit einem Durchmesser von 180 mm

Foto: Diamond Materials

Plansee SE, Reutte, Österreich

Für das Aufheizen des Fusionsplasmas auf die notwendigen Temperaturen von circa 100 Millionen Grad Celsius werden Heizleistungen benötigt, die ohne weiteres einige zehn Millionen Watt betragen. Obwohl das heiße Plasma im Inneren des Gefäßes von den magnetischen Kräften in Schwebelage gehalten wird, gerät es an seinem Außenrand dennoch in Kontakt mit den umgebenden Wänden. Das Plasma kühlt sich vom Zentrum bis zur Wand dramatisch ab, nämlich auf „nur“ noch etwa 100.000 Grad Celsius. Zum Schutz der Gefäßwand muss der hohe Wärmefluss aus dem Plasma über die Wand abgeführt werden. Dabei kommen an den höchstbelasteten Stellen mit Wasser oder Gas gekühlte Wandelemente aus Kohlenstoff oder Metall zum Einsatz. Diese Höchstleistungswärmetauscher werden als Divertoren bezeichnet.

Wendelstein 7-X soll demonstrieren, dass Stellaratoren dauerhaft betriebsfähig sind. Das setzt einen leistungsfähigen Divertor voraus. Plansee SE entwickelte hierfür sogenannte Targetelemente. Sie müssen pro Quadratmeter zehn Millionen Watt kontinuierlich abführen und erfordern daher eine geschickte Kombination aus kohlefaserverstärktem Kohlenstoff und einem wassergekühlten Metallblock, der sogenannten Wärmesenke. Wichtige Entwicklungsschritte wurden in enger Kooperation mit dem IPP vorangetrieben:

**10.000 Herdplatten
auf einem Quadratmeter
Die hochbelastete Wand
des Wendelstein 7-X**

Hochbelastbare, wassergekühlte Wandelemente



Foto: IPP, Michael Herdlein

► Besonders schwierig ist das Fügen des kohlenstofffaserverstärkten Kohlenstoffs auf die wassergekühlte Wärmesenke aus einer Metalllegierung. Der Kohlenstoff ist dem Plasma und sehr hohen Wärmequellen ausgesetzt. Die Wärmesenke wird bei hohem Druck von Wasser durchströmt. Um beide Elemente zu verbinden, versah man den Kohlenstoff zunächst mit einer strukturierten Kupferschicht, die erst danach auf die Metallsenke geschweißt werden konnte. Nur so war eine gute Wärmeleitung von der Oberfläche der Kohlenstoffschicht zur Wärmesenke sicherzustellen. Gleichzeitig galt es, die unterschiedliche Wärmeausdehnung der Materialien zu kompensieren. Dieses Verfahren wurde von Plansee patentiert.

► Die wassergekühlten Wärmesenken müssen im Dauerbetrieb große Wärmemengen abführen können. Das Kühlwasser wird unter hohem Druck durch das Innere des Metallkörpers geleitet. Dafür musste der Kühlkanal so gestaltet werden, dass die Wasserströmung turbulent wird und so mehr Wärme transportieren kann.

► Die Qualitätssicherung für dieses komplexe, aus mehreren Materialien zusammengesetzte Bauteil stellte vor allem bei der Serienfertigung (insgesamt 890 Stück, 18.000 Kacheln) eine Herausforderung dar. Das IPP als Auftraggeber hat mit der Firma Plansee einen Qualitätssicherungsplan entwickelt, der auf

einer Mischung aus systematischen Prüfungen und stichprobenartigen Hochbelastungstests beruht. Bei der zerstörungsfreien Prüfung der Verbindungen konnte man nicht auf Standardverfahren zurückgreifen. Die Firma entwickelte spezielle Prüfverfahren auf der Basis von Ultraschall-, Röntgen- und Thermografieuntersuchungen.

Zehn Millionen Watt pro Quadratmeter – damit ist die Wand des Wendelstein 7-X höher belastet als die Flügelkanten des Space Shuttle beim Eintritt in die Atmosphäre (6 Millionen Watt pro Quadratmeter, die dort allerdings „nur“ für einige 100 Sekunden auftreten). Auch dort werden kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffkacheln verwendet. Hier treffen sich Raumfahrt- und Fusionstechnologien im Bereich der extrem wärmebelasteten Materialien. Unter der Leitung des IPP wurde zu diesem Thema ein großes EU-gefördertes europäisches Verbundprojekt durchgeführt: EXTREMAT. Plansee war unter den über 30 vornehmlich industriellen Partnern führend beteiligt.

Targetelemente bei der Thermografieprüfung



Foto: Plansee SE

Basierend auf einer für das französische Fusionsexperiment Tore Supra entwickelten Technologie hat Plansee mit dem IPP diese Technologie für Wendelstein 7-X weiterentwickelt und dabei die Qualität und die Zuverlässigkeit verbessert. Die gut wärmeleitende Verbindung von kohlenstofffaserverstärktem Kohlenstoff mit Metallen wird sicherlich auch in anderen Technologiefeldern zur Anwendung kommen.

Bilfinger Noell GmbH, Würzburg, Deutschland ASG Superconductors SpA, Genua, Italien

„Die Form hat uns die Natur gesagt.“ Die supraleitenden Magnetspulen des Wendelstein 7-X

1 00 Millionen Grad heiß ist das Plasma, das in Wendelstein 7-X untersucht wird. Ringförmige magnetische Felder, die in sich verdrillt sind, schließen es wärmeisoliert ein und halten es von den kalten Gefäßwänden fern. Bei Stellarator-Fusionsanlagen wird das magnetische Feld allein durch die Form der äußeren Magnetspulen bestimmt. In den bizarren Spulenwindungen haben die Rechnungen der Forscher und Forscherinnen Gestalt gewonnen. Über zehn Jahre lang haben sie per Supercomputer nach dem idealen Magnetfeldkäfig gesucht. Die Spulen technisch zu realisieren war für die Bilfinger Noell GmbH eine Herausforderung. Sie gründete ein Konsortium und ein europäisches Netzwerk mit mehreren Unterauftragnehmern und löste unter anderem diese Probleme:

Für die supraleitenden Wickelpakete der Spulen entwickelten die Konsortialpartner Bilfinger Noell GmbH und ASG Superconductors SpA Methoden, den Supraleiter in die räumlich komplexe Form zu bringen. Wickelformen wurden gebaut und erfolgreich eingesetzt. Bilfinger Noell sammelte zudem Erfahrungen bei der Konstruktion der Stahlgehäuse und deren Fertigung mit einem optimierten Gussverfahren, der Bettung der Wickelpakete in die Stahlgehäuse und deren hochgenauer mechanischen Bearbeitung.

Bei einer Schnellabschaltung liegen sehr hohe Spannungen an. Die Spulen müssen robust sein und diesen Spannungen widerstehen. Daher absolvierte jede einzelne Spule verschiedene Tests mit Spannungen bis zu 13.000 Volt. Ein besonders empfindlicher Hochspannungstest, den das IPP mit Bilfinger Noell eigens für die Werksprüfung entwickelte, fand in einer dünnen Gasatmosphäre statt. Schwächen in der elektrischen Isolation zeigten sich dabei in einer Leuchterscheinung und konnten zielgenau repariert werden. Dieser – sehr strenge – „Paschen-Test“ hat neue Standards in der Qualitätssicherung supraleitender Magnete gesetzt.

Das Team der Bilfinger Noell GmbH hat im Zuge dieses Auftrags umfangreiche Kompetenz entwickelt. Diese ist seither auch anderswo gefragt, etwa bei ITER US für eine eigene Paschen-Test-Anlage. Das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung vertraute dem Unternehmen die Fertigung der supraleitenden Magnete für den internationalen Teilchenbeschleuniger FAIR in Darmstadt an. ASG Superconductors hat die bei den Wendelstein 7-X-Spulen gewonnenen Erfahrungen in ein Konsortium eingebracht, das sich für die ITER-Toroidalfeld-Spulen beworben hat und nun die EU-Wickelpakete für den internationalen Testreaktor herstellt.



Foto: IPP, André Klünzelmann



◀ Fertigung der nichtplanaren Spulen von Wendelstein 7-X
▼ Nichtplanare Spule – hier beim „Spulenfädeln“

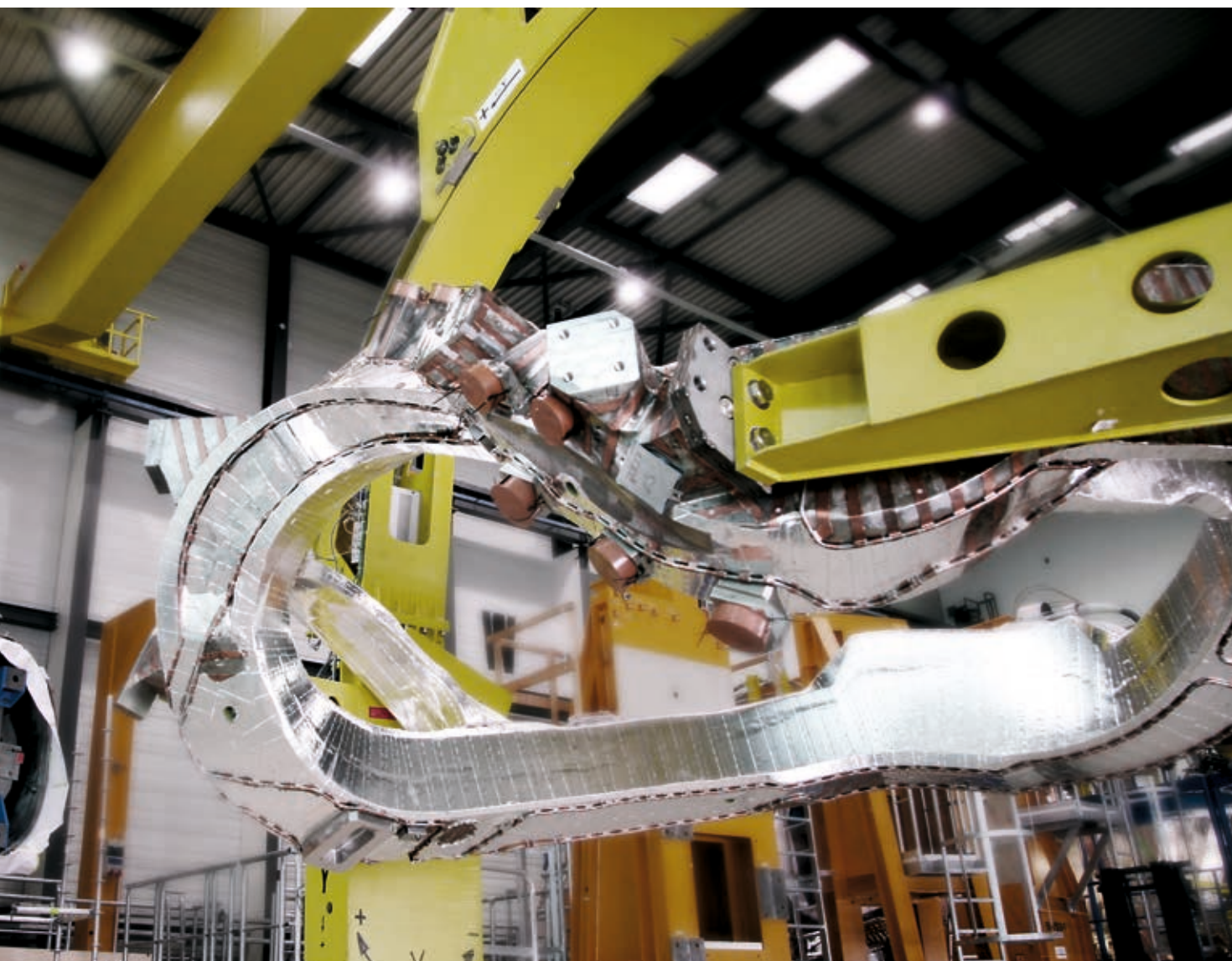


Foto: IPP, Anja Richter

Linde Kryotechnik AG, Pfungen, Schweiz Linde Engineering, München, Deutschland

Die Magnete des Wendelstein 7-X müssen auf -270 Grad Celsius abgekühlt werden. Bei dieser Temperatur, die weniger als vier Grad über dem absoluten Nullpunkt liegt, setzt die Supraleitung ein. Dazu wird flüssiges Helium durch einen Hohlraum im Leiter der Magnetspulen gepumpt. Eine große Kälteanlage verflüssigt das Heliumgas und bringt es auf Tieftemperatur. Da es in einen geschlossenen Kühlkreislauf eingespeist wird, muss die Anlage auf die verschiedenen Betriebszustände der Magnete äußerst flexibel reagieren können.

Die Linde Kryotechnik entwickelte für Wendelstein 7-X eine Spezialanlage basierend auf industriell verfügbarer Technologie. Den außergewöhnlich hohen Anspruch an die Flexibilität der Kryoanlage erreichte Linde, indem Turbinen, kalte Kompressoren und hauptsächlich kalte Zirkulatoren geschickt kombiniert wurden, während ein Speichertank für flüssiges Helium rasche Leistungssteigerungen ermöglicht. Die Helium-Kälteanlage von Wendelstein 7-X ist eine der modernsten und flexibelsten weltweit.

Durch den Bau der durch ihre Flexibilität und Präzision sehr speziellen Kälteanlage von Wendelstein 7-X konnte die Linde Kryotechnik ihre Expertise in der Konzeption von komplexen Großkälteanlagen im Tieftemperatursegment ausbauen und sich für neue Großprojekte weiter qualifizieren. Für den internationalen Experimentreaktor ITER in Südfrankreich liefert Linde Kryotechnik das Helium-Verteilssystem. Auch in Südschweden, wo ab 2023 die Europäische Spallationsquelle ESS Neutronen mit der welthöchsten Intensität liefern soll, setzt man auf Linde-Knowhow.



Nahe dem absoluten Nullpunkt Kälteanlage für Wendelstein 7-X

Kalt, kälter, Wendelstein 7-X – Blick in die Kryoanlage



„Sechs Tonnen mit der Präzision eines Uhrmachers positionieren“ Entwicklung von Spezialwerkzeugen und -anlagen für die Montage

RST Rostock System-Technik GmbH, Deutschland

Um sie montieren zu können, mussten die Spulen, Stützen und Gefäßeinbauten von Wendelstein 7-X in allen sechs Freiheitsgraden ausrichtbar sein. Die engen Bauräume schränkten die Bedienung der Montagevorrichtungen stark ein und die Vorgaben an die Genauigkeit waren extrem. RST fertigte zwei Manipulatoren zur präzisen Positionierung und Ausrichtung der bis zu 3,5 Meter großen und bis zu sechs Tonnen schweren Spulen, ein drehbares und exakt positionierbares Montageportal, das die Maschine überspannte, sowie einen

Manipulator, der im beengten Maschineninneren computergesteuert das hochgenaue Positionieren der Einbauteile übernahm. Weitere Systeme für den schrittweisen Ausbau von Wendelstein 7-X halten im gekrümmten Plasmagefäß bis zu 70 Kilogramm schwere Komponenten und positionieren sie millimetergenau. Da das Gefäß inzwischen mit Wandverkleidungen aus Grafit und physikalischen Messinstrumenten ausgestattet ist und auch das Montagepersonal noch Platz braucht, ist eine minimale Baugröße oberstes Gebot.



Foto: Fama Robotics

Roboter wurden für das Halterungen an den Innen-

Positionieren von circa 6.000 Bolzen und wänden des Plasmagefäßes eingesetzt.

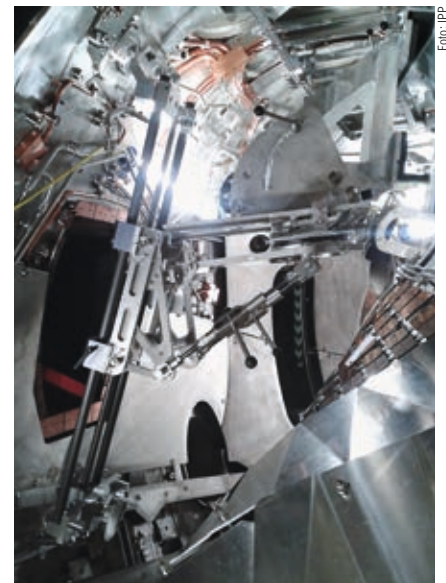


Foto: IPP

Positioniervorrichtung für den seit 2018 laufenden Umbau von Wendelstein 7-X

RST hat für das IPP eine komplexe Handhabungstechnik entwickelt, die letzte Raumreserven ausnutzt. Die Systeme sind praktikabel, stabil und erreichen Genauigkeiten von bis zu 0,5 Millimetern. Die Aufträge brachten der Firma Konstruktions- und Fertigungs-Knowhow, das sie in einem Spezialgebiet leistungsfähiger werden lässt. RST hat sich genaue Kenntnisse über die Positionsregelung und -steuerung von verschiedenen Präzisionsvorrichtungen erarbeitet, die auch unter eingeschränkter Zugänglichkeit- und Beobachtbarkeit wirtschaftlich anwendbar sind. Das erlangte Knowhow kann branchenübergreifend eingebracht werden. Die Raumfahrt ließ sich von RST dafür begeistern, pragmatisch-technische Handling-Konzepte, die im IPP-Umfeld zur Erstanwendung kamen, in eigene Systeme zu integrieren. In Folgeprojekten profitierte auch das IPP von transferierten Lösungsansätzen.



Foto: TÜV Rheinland

Wendelstein 7-X

TÜV Rheinland AG, Köln, Deutschland

Keine Kompromisse Kernfusion und Strahlenschutz

Ob „Sicherheit und Kernfusion“ oder „Strahlenschutz und Kernfusion“: Wer diese beiden Begriffe googelt, landet unmittelbar in Greifswald, genauer bei Wendelstein 7-X. Und das hat einen guten Grund, denn Fusion ist nicht nur in der Forschung, sondern auch im Bereich der Sicherheit und des Strahlenschutzes ein Zukunftsthema.

Im technischen Regelwerk des Strahlenschutzes und der Kerntechnik gibt es keine speziellen Regeln für Fusionsanlagen, deren Sicherheitseigenschaften sich deutlich von Spaltungskraftwerken unterscheiden. Daher kann bei der Beurteilung des Sicherheitskonzeptes von Wendelstein 7-X nicht auf ein etabliertes, unmittelbar anwendbares Regelwerk zurückgegriffen werden. Dies war insbesondere herausfordernd, da die Experimentieranlage aus Sicht der Sicherheit und des Strahlenschutzes einen hochkomplexen, nicht-statischen Aufbau besitzt und Besonderheiten der Fusion zu berücksichtigen sind. Der Entwicklungsweg der Anlage reicht von einfachen Wasserstoff-Plasmen geringer Dichte und kurzer Dauer ohne unmittelbare Strahlenschutzrelevanz bis zu langanhaltenden, dichten Deuterium-Plasmapulsen mit der Erzeugung von ionisierender Strahlung und in sehr geringem Umfang auch radioaktivem Tritium.

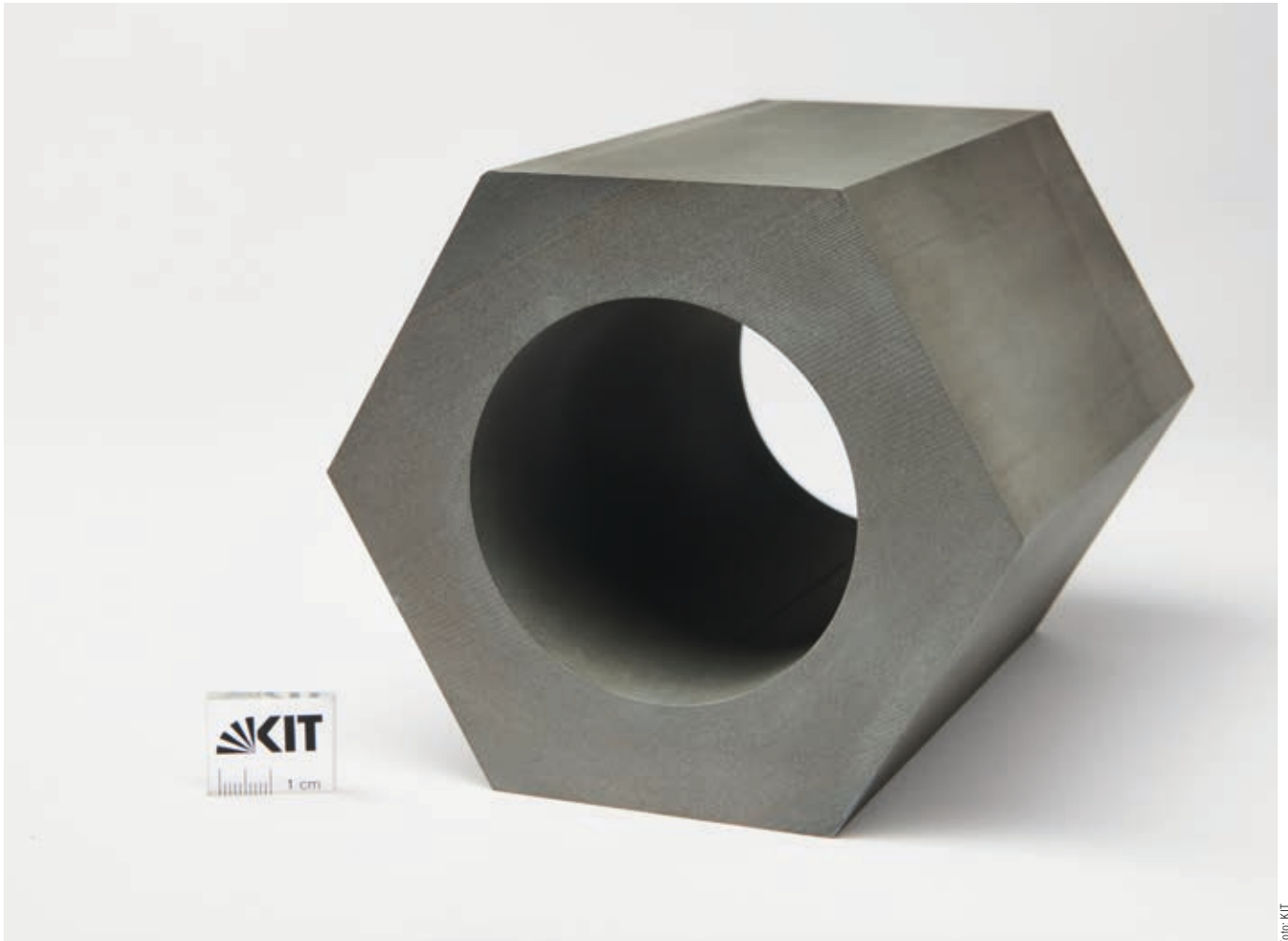
Sicherheits- und Strahlenschutzprüfungen dienen dem Ziel, den Schutz des Menschen und der Umwelt vor den schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung zu gewährleisten. TÜV Rheinland, ein weltweit führender unabhängiger Prüfdienst-

TÜV Rheinland konnte einen einzigartigen Einblick in die aktuelle Entwicklung der Fusionsforschung gewinnen und sein umfassendes Knowhow aus langjähriger Erfahrung unter anderem mit Forschungsreaktoren, Großbeschleunigeranlagen und Kernkraftwerken einbringen. Dieses Knowhow wird auch für den sicheren Betrieb von ITER eine Rolle spielen, wo TÜV Rheinland bereits Erfahrungen aus der Inbetriebnahme von Wendelstein 7-X einbringen konnte.

leister, verfügt über einen Erfahrungsschatz unterschiedlichster Anwendungen ionisierender Strahlung in der Forschung, Medizin, Technik sowie zur Energieerzeugung. Hieraus wurden auf die Anwendung bei Wendelstein 7-X übertragbare Sicherheits- und Strahlenschutzanforderungen abgeleitet. Im Fokus standen dabei insbesondere die Überwachung und Kontrolle der Erzeugung von Neutronen und Tritium als Folge der Fusionsreaktionen.

In einem mehrstufigen Verfahren wurde geprüft, welche Randbedingungen erfüllt sein müssen, um die Sicherheit und den Strahlenschutz zu gewährleisten und ob die dafür erforderlichen technischen, organisatorischen und personellen Maßnahmen entweder bereits eingerichtet sind oder rechtzeitig vor dem Erreichen der betreffenden Experimentphase noch ergriffen werden können. Daraus entstand ein Prozess der vorlaufenden und begleitenden Sicherheitsüberprüfung, der es erlaubt, die Anforderungen für eine sich dynamisch entwickelnde Experimentieranlage jederzeit auf dem Stand von Wissenschaft und Technik des Strahlenschutzes sicherzustellen.

Ulba Metallurgical Plant JSC, Ust-Kamenogorsk, Kasachstan



Hexagonaler TiBe12-Block nach der Endbearbeitung

Damit sich der Kreislauf schließt
Neutronenmultiplikator
zur Tritium-Erzeugung im
Demonstrationskraftwerk DEMO

In einem künftigen Fusionskraftwerk wird das sogenannte Blanket die innere Wand des Plasmagefäßes bedecken. Die durch die Fusionsreaktion entstehenden schnellen Neutronen geben darin ihre Energie in Form von Wärme ab. Außerdem erzeugen die Neutronen durch Wechselwirkung mit dem im Blanket enthaltenen Lithium den für die Fusion benötigten Brennstoff Tritium. Nicht alle Neutronen erreichen die Zone mit dem Lithium – gefragt sind deshalb Materialien, die als Neutronenmultiplikator wirken.

Bisher galt reines Beryllium als das am besten geeignete feste Material für Neutronenmultiplikatoren, um die Tritium-Selbstversorgung zu gewährleisten, die für das Schließen des Brennstoffkreislaufs notwendig ist. Das bisherige Referenzkonzept, das heliumgekühlte Feststoffblanket-Modul zur Tritiumerzeugung für den experimentellen Fusionsreaktor ITER, basierte auf abwechselnden Schichten aus Lithium-Keramik und Beryllium-Kügelchen. Bestrahlungstests zeigen jedoch, dass bei Temperaturen unter 500 Grad Celsius fast das gesamte erzeugte Tritium im Beryllium verbleibt. Die Betriebstemperatur eines Beryllium-Schüttbettes soll jedoch 650 Grad Celsius nicht überschreiten, weil das Beryllium sonst zu stark anschwillt – das Aus für dieses Konzept.

Seit 2004 entwickelt ein Team des Karlsruher Instituts für Technologie fortgeschrittene Materialien für Neutronenmultiplikatoren auf der Basis von intermetallischen Berylliumlegierungen. Diese Materialklasse zeichnet sich durch eine geringere Tritium-Rückhaltung und Schwellung bei gleichzeitig höherer Schmelztemperatur aus – wesentliche Vorteile für das Tritiumerzeugende Blanket-Design. Sie erlaubten entscheidende konzeptionelle Änderungen des Feststoffblanket-Moduls: Lithiumhaltige Keramikkügelchen sind von massiven sechseckigen Blöcken aus Titan-Beryllid umgeben. Dieses innovative Design wird derzeit als neues Referenz-Konzept für das heliumgekühlte Feststoffblanket des europäischen Demonstrationskraftwerks DEMO, des ITER-Nachfolgers, favorisiert.

Ein wichtiger Schritt dahin war die Entwicklung einer industriellen Fertigungstechnologie für hexagonale Blöcke aus Titan-Beryllid. Das KIT arbeitete hierfür eng mit dem Unternehmen Ulba Metallurgical Plant zusammen. Das in der Entwicklung von Berylliden erfahrene KIT-Expertenteam lieferte die Geometrie- und Materialspezifikationen sowie die Grenzen für die wichtigsten technologischen Parameter. Für die industrielle Herstellung von berylliumhaltigen Produkten erwies sich schließlich die pulvermetallurgische Fertigungsroute als der optimale Weg: Zunächst wurde das Material mit heiß-isostatischem Pressen (HIP) fünf Stunden lang bei 1150 Grad Celsius unter Argon-Druck von 1320 bar behandelt, um Titan-Beryllid-Pulver herzustellen. Anschließend wurde das zusammen-

Dank dieser Entwicklung ist Ulba Metallurgical Plant JSC nun in der Lage, komplexe Formen aus Berylliden zu fertigen. Bereits in den 1960er Jahren untersuchte man solche Materialien als potenzielle Hochtemperaturwerkstoffe für Raumfahrt und Flugzeuge. Wegen des komplizierten Herstellungsprozesses wählte man damals jedoch andere Verbindungen aus. Die heute durchgeführte Optimierung dieser Herstellungstechnologie verbunden mit einer beträchtlichen Preissenkung könnte dazu führen, dass sich ein neuer Markt für diese Werkstoffe bildet. Dies gilt insbesondere für solche Anwendungen, bei denen Sprödigkeit durch außergewöhnliche Festigkeit kompensiert werden kann. Das Expertenteam von Ulba Metallurgical Plant ist stolz darauf, dieses wichtige technologische Problem gemeinsam mit dem KIT gelöst zu haben. Auf Kundenwunsch neue Produkte zu entwickeln – das Unternehmen konnte zeigen, welches Potenzial hier in ihm steckt.

gepresste Beryllid zu Pulver gemahlen und erneut verfestigt, diesmal durch Vakuum-Heißpressen. Es zeigte sich, dass die letztgenannte Methode im Gegensatz zu den HIP-Blöcken keine Risse erzeugt.

Beryllide sind sehr harte und spröde Materialien. Um die äußere sechseckige Form fertigzustellen und das innere Loch zu schneiden, setzte die Firma Drahtelektroerosion und Wasserstrahl-Schneidverfahren ein. Zusammen gelang es, erstmalig Blöcke aus Titan-Beryllid industriell herzustellen, die es auf eine Größe von 144×150 Quadratmillimetern bringen und deren Dichte 98,8 Prozent des theoretisch berechneten maximalen Wertes erreicht.

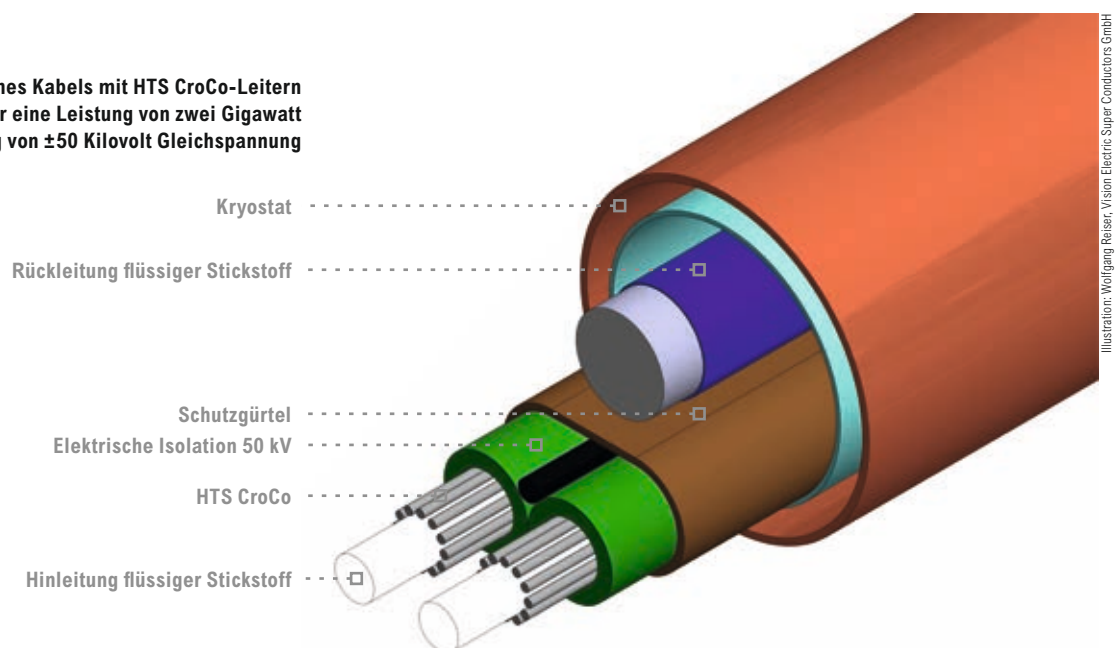
Die Herstellung mehrerer Blöcke von Titan- und Chrom-Berylliden zeigt die gute Replizierbarkeit dieses neuartigen Ansatzes. Das ebnet den Weg für ein maßstabsgetreues prototypisches Modell sowie für dessen Qualifizierung und Funktionstests unter den Bedingungen, die für das heliumgekühlte Feststoffblanket des DEMO-Fusionsreaktors erwartet werden.



Die innovative HTS-CroCo-Technik öffnet neue Möglichkeiten für künftige Fusionsreaktoren. Zusätzlich bietet diese Neuentwicklung aber auch Chancen, die Verluste beim Transport hoher Ströme zu minimieren. Der einfache Herstellungsprozess der HTS-CroCos ist auf eine industrielle Fertigung in großen Längen ausgelegt. Eine parallele Nutzung (Verseilung) mehrerer HTS-CroCos erlaubt Ströme bis weit über 100.000 Ampere. Die Firma Vision Electric Super Conductors GmbH wird diese Technik z.B. in Elektrolyseanlagen verwenden, wodurch die ansonsten auftretenden Verluste drastisch abgesenkt werden. Darüber hinaus ist aber auch der verlustfreie Transport von hohen Gleichströmen über weite Strecken in schlanken, unterirdischen Trassen möglich.

Manche mögen's kalt HTS-CroCo-Leiter – die Grundlage für zukünftige, kompakte und effiziente Kabel im Netzausbau

**Aufbau eines Kabels mit HTS CroCo-Leitern
für eine Leistung von zwei Gigawatt
bei einer Spannung von ± 50 Kilovolt Gleichspannung**



Aus zahlreichen industriell gefertigten HTS Bändern wird ein HTS CroCo geformt



Vision Electric Super Conductors GmbH, Kaiserslautern, Deutschland

Supraleiter können hohe Magnetfelder für den Plasmaeinschluss energieeffizient bereitstellen und sind daher für künftige Fusionskraftwerke unverzichtbar. Bisher verwendet man für Fusionsspulen ausschließlich die klassischen Supraleiter Niob-Zinn und Niob-Titan. Diese müssen auf -269 Grad Celsius gekühlt werden. Neuere Hochtemperatursupraleiter bieten hinsichtlich Temperatur und Magnetfeld einen wesentlich größeren Einsatzbereich. Die erste Generation solcher Hochtemperatursupraleiter wird gerade in den Stromzuführungen des im Aufbau befindlichen internationalen Experimentalreaktors ITER verbaut.

Am Karlsruher Institut für Technologie geht die Entwicklung weiter voran: Auf Basis einer überlegenen zweiten Generation hat das KIT aufbauend auf seiner Erfahrung mit Supraleitern in der Fusion den HTS-Kreuzleiter (im Englischen HTS CrossConductor oder kurz „CroCo“) entwickelt. Er ermöglicht eine einfache und industrietaugliche Verarbeitung der von der Industrie bereitgestellten HTS-Bänder zu Hochstrom-Leitern in großen Längen. Hierbei fügt man die HTS-Bänder zweier Breiten in einem kontinuierlichen Verfahren zu einem kreuzförmigen Querschnitt zusammen. Ein HTS-Kreuzleiter, gefertigt aus drei und zwei Millimeter breiten HTS-Bändern, kann mit in der Industrie weit verbreitetem flüssigem Stickstoff bei -196 Grad Celsius gekühlt werden; er trägt bei einem Durchmesser von vier Millimetern einen Strom von 1500 Ampere. Benutzt man sechs und vier Millimeter breite Bänder sind es bei einem Durchmesser von circa acht Millimetern schon mehr als 3000 Ampere im Eigenfeld. Aktuell untersucht man, ob die HTS-CroCo-Fertigungsmethode für das auf ITER folgende Demonstrationskraftwerk „DEMO“ genutzt werden kann.

Die HTS-CroCo-Technik wurde an die Vision Electric Super Conductors GmbH, Kaiserslautern lizenziert. Die Firma bietet supraleitende Hochstrom-Transportsysteme an, um Gleichstrom aufgrund der bei Supraleitern fehlenden Energieverluste mit hoher Effizienz zu transportieren. Durch die HTS-CroCo-Technik lassen sich HTS-Bänder in großen Längen einfach verarbeiten. Dies wurde bereits für HTS-CroCos von über 50 Metern demonstriert. Zudem kann die Bündelung mehrerer HTS-CroCos die Stromtragfähigkeit vervielfachen. Genutzt werden können solche supraleitenden Hochstromkabel z.B. bei Elektrolyse-Anlagen, wo Ströme bis zu 200.000 Ampere und mehr notwendig sind. Eine weitere Anwendung ist der Energietransport mit hohen Strömen bei niedrigen Spannungen über weite Strecken. Da die HTS-CroCos weniger Platz als herkömmliche Kabel benötigen, kann dies in schlanken, unterirdisch geführten Trassen erfolgen. Die Vision Electric Super Conductors GmbH hat ein erstes Layout für solch kompakte und effiziente Gleichstrom-Kabel für den Netzausbau vorgestellt.



HTS CrossConductor mit
zusätzlicher Kupfer-Ummantelung

Fotos: Walter Fietz, KIT

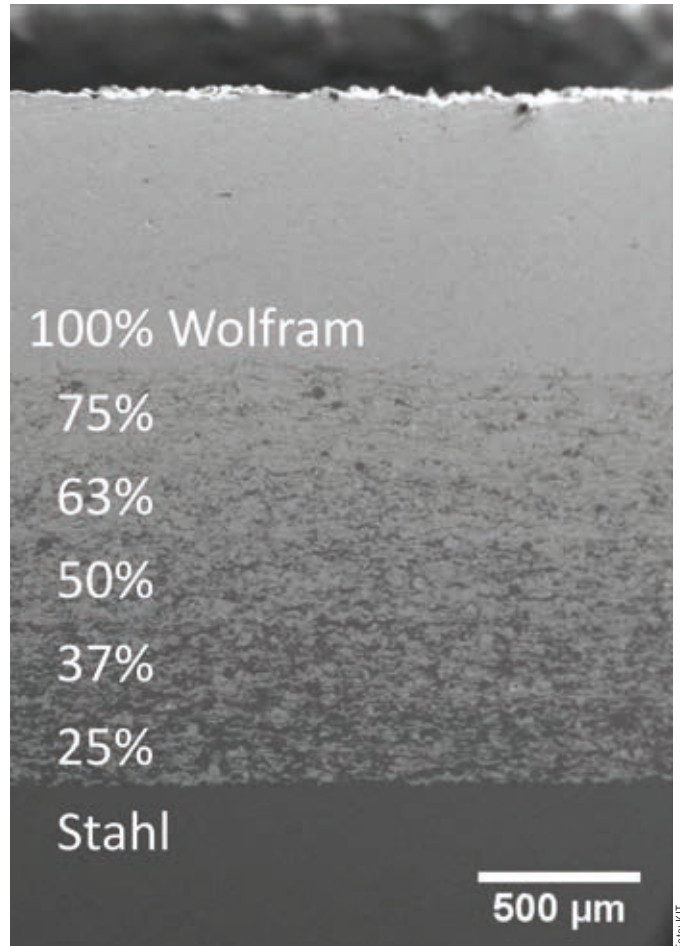
COATEC GmbH, Schlüchtern, Deutschland

Für die nachhaltige Energiegewinnung aus Kernfusion ist es erforderlich, Wasserstoffplasma auf ein Vielfaches der Sonnentemperatur zu erhitzen. Trotz magnetischer Abschirmung ist die stählerne erste Wand des Fusionsreaktors extremer Hitze ausgesetzt. Ohne Schutz würde sie weichglühen und durch Beschuss mit Teilchen aus dem Plasma erodieren. Für die Schutzschicht eignet sich metallisches Wolfram. Es besitzt die höchste Schmelztemperatur aller Metalle, ist erosionsresistent und leitet die Wärme schnell nach außen ab, um damit Energie zu gewinnen.

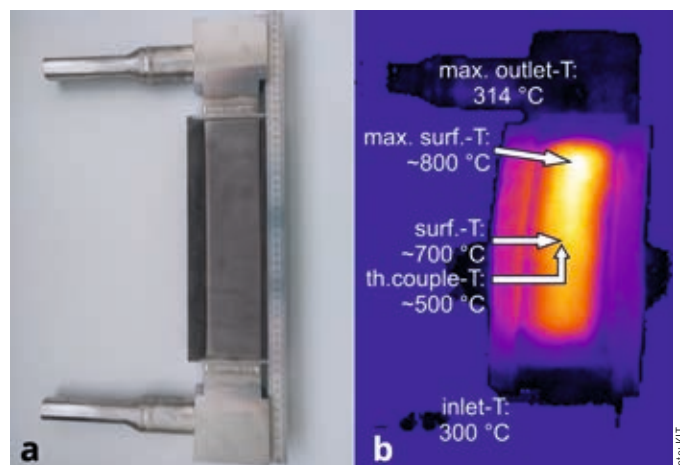
Die technologische Herausforderung für die COATEC GmbH besteht darin, großflächig eine auf der Stahloberfläche haftende Wolframschicht zu erzeugen. Bei direkter Verbindung mit Stahl würde das Wolfram bei der Herstellung oder im Betrieb abplatzen. Das ist wegen der stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnung der beiden Materialien der Fall. Das KIT löste diese Schwierigkeit zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich, indem man eine funktionsgradierte Haftschrift entwickelte. In mehreren gemischten Stahl-Wolfram-Schichten erhöht man dabei schrittweise den Wolframgehalt, bis am Ende reines Wolfram die Deckschicht bildet. Solche Beschichtungen überstehen fusionsrelevante Hochtemperatur-Belastungsszenarien schadlos.

Die COATEC GmbH stellt die Schichten über Vakuum- bzw. Niederdruck-Plasma-Spritzen her. Mit diesem Verfahren kann COATEC alle Teilschichten in nur einem Arbeitsgang fertigen und relativ einfach hochskalieren. Das ist wegen der großen Oberfläche der ersten Wand notwendig. Bei über 1000 Quadratmetern Wandfläche pro Reaktor sowie zusätzlichen Ersatzmodulen eröffnet diese technologische Meisterschaft hier in Zukunft eine stetige Nachfrage.

Ein halber mal ein Viertel Quadratmeter: Im Zuge des Projekts wurde ein neuer Größenrekord an beschichteter Fläche aufgestellt. Die Beschichtungstechnologie von ebenen auf gewölbte Oberflächen, wie sie an der ersten Wand in künftigen Fusionskraftwerken ebenfalls auftreten werden, zu übertragen – das wird bereits vorbereitet und in Kürze erprobt.



So ist die Schutzschicht aufgebaut.



Links: Beschichtetes Modell für Hochtemperatur-Stresstest.
Rechts: Die Oberflächentemperatur während des Stresstests.

Geschlossene, haftende Schichten aus Wolfram zu erzeugen ist anspruchsvoll. Die hohe Temperaturbeständigkeit bei gleichzeitiger Leitfähigkeit machen das Material auch abseits der Fusion interessant. Indem sie hier ihre Technologie optimiert, erschließt sich die COATEC GmbH wertvolles Knowhow für andere Sektoren, wie etwa für Kollektoren in der solarthermischen Energiegewinnung oder Wolfram-Kupfer-Komponenten in der Hochspannungstechnik.

COATEC, seit Jahrzehnten als Spezialist für hochwertige Beschichtungen auf Gasturbinenkomponenten am Markt aktiv, arbeitet für die großen Turbinenhersteller. Die selbst erbauten Vakuum-Beschichtungsanlagen des Unternehmens weisen einige Besonderheiten auf, die sie für große Bauteile ertüchtigen. Durch Betrieb zweier kombiniert operierender Plasma-Spritzeinheiten erreicht die COATEC GmbH einerseits eine gleichmäßige Wärmeeinbringung in die Bauteile und andererseits einen Materialauftrag bei maximaler Kontrolle über die Bauteiltemperatur. So fertigt sie Schutzschichten mit optimaler Haftung auch auf großen Flächen und ist für eine Serienproduktion bestens ausgestattet.

COATECs Expertise in der Bearbeitung von Turbinenschaufeln treibt die Beschichtung von größeren Erste-Wand-Elementen mit gradierten Schichten auf gekrümmten Oberflächen voran. Indem im Rahmen der Projektbearbeitung Großkammern aufgebaut werden, lassen sich auch große Elemente entsprechend beschichten.

Plasma-gespritzter Plasmaschutz Gradierte Wolfram-Stahl- Schutzschicht für die erste Wand

Nächster Schritt:
Krumme Kanten beschichten

Wissenstransfer an die Industrie
und Hochskalierung

Beschichtete Platte mit Kühl-
system für Hochtemperaturtest

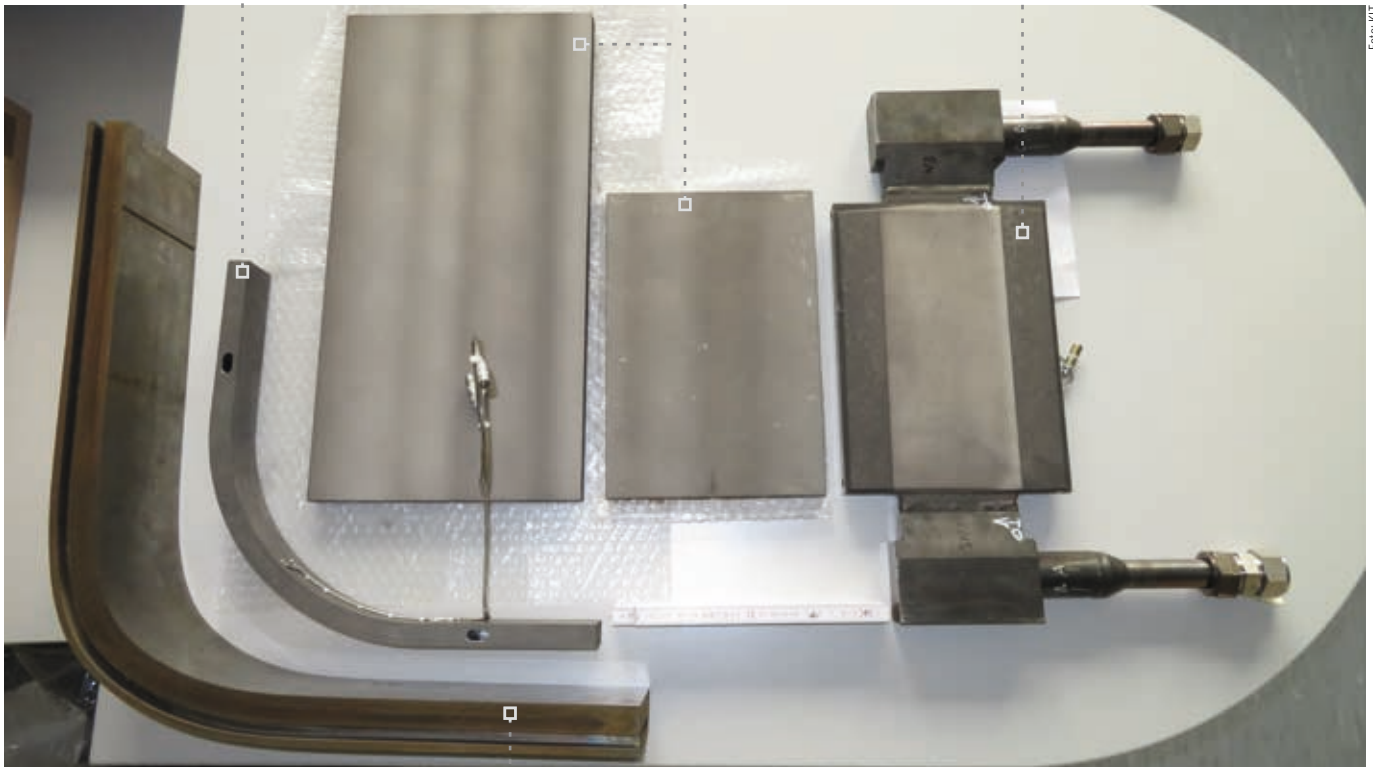


Foto: KIT

Ausblick: Hochskalierung bis hin
zu kompletten Wandsegmenten

Gegenwärtige und künftige Entwicklungsschritte der Wolfram-Schutzschicht

Sie soll die intensive Neutronenstrahlung in künftigen Fusionskraftwerken simulieren: IF-MIF-DONES, die „DEMO-Oriented Neutron Source“ der International Fusion Materials Irradiation Facility, ist eine Forschungseinrichtung, die in Granada, Spanien entsteht. Die Testanlage „Helium Loop Karlsruhe – Low Pressure“ (HELOKA-LP) wiederum ist ein wichtiger Baustein in der Entwicklung dieser Einrichtung.

An IFMIF-DONES sollen neuartige Materialien entwickelt und lizenziert werden, die in plasmahen Komponenten eines ersten Demonstrationskraftwerks zum Einsatz kommen sollen. Diese Materialien müssen gegen hochenergetische Neutronenbestrahlung und hohe Temperaturen resistent sein, die während des Fusionsprozesses entstehen. In DONES werden die für die Fusion typischen schnellen Neutronen mit Hilfe eines Teilchenbeschleunigers künstlich erzeugt. In optimierten Bestrahlungsmodulen sollen vor allem innovative Stahlsorten hohen Neutronenflüssen ausgesetzt werden. Tests im Heliumkreislauf HELOKA-LP ermöglichen die Entwicklung und Optimierung der Bestrahlungsmodule.

Für die Konzeption, Planung, den Aufbau und die Inbetriebnahme von HELOKA-LP bewältigte Kraftanlagen Heidelberg als Generalunternehmer anspruchsvolle Aufgaben:

- ▶ Die HELOKA-LP-Anlage liefert die Kühlgas-Strömung durch das Bestrahlungsmodul, wobei die Strömung die halbe Schallgeschwindigkeit erreicht. Es kann wahlweise Helium oder Druckluft gefördert werden. Helium als einatomiges, leichtes Gas erfordert höchste Dichtheit. Das niedrige absolute Druckniveau bei gleichzeitig hohen Druckdifferenzen setzt zudem ein besonderes Management des Gasinventars voraus. Daher entwickelte man einen angepassten Anfahrvorgang.
- ▶ Bei den Versuchen an der HELOKA-LP-Anlage wird die in IFMIF-DONES vorherrschende Neutronen-Heizung durch eine neu konzipierte und gebaute elektrische Heizung ersetzt.
- ▶ Der Anlage ist ein Heliumversorgungssystem inklusive Vakuumeinheit beigelegt. Es garantiert sowohl die Verfügbarkeit als auch die Reinheit des Heliums. Die Reinheit ist wichtig, um Korrosionsproblemen entgegenzuwirken.
- ▶ Betriebsdrücke, Massendurchfluss und Betriebstemperaturen – mittels eines komplexen Regelungssystems lässt sich am Eintritt des prototypischen Bestrahlungsmoduls ein breites Spektrum an Betriebsbedingungen einstellen. Das ist zur Validierung des Testmoduls notwendig. Gesteuert und vollautomatisch betrieben wird die Anlage dabei über ein Prozessleitsystem (Siemens PCS7).



Testen, testen, testen!
HELOKA-LP – Besondere Materialien
erfordern besondere Anlagen

Kraftanlagen Heidelberg GmbH, Deutschland

Die Testanlage HELOKA-LP am Karlsruher Institut für Technologie



Foto: KIT

Helium-Anlagen mit vergleichbaren Parametern (Massenstrom bis 120 g/s Helium, typische Drücke 3 bar, Antriebsleistung 350 kW) wurden bisher noch nicht gebaut. Dank der Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie konnte Kraftanlagen Heidelberg, Mitglied der französischen Bouygues Construction SA, hier neues Knowhow erwerben. Das Unternehmen ist nun bestens dafür aufgestellt, sich am zukünftigen DONES-Kühlsystem und weiteren Subsystemen, beispielsweise im Fernhandlungsbereich der Anlage, zu beteiligen. Am KIT erprobte man bereits erfolgreich den ersten Prototyp eines Bestrahlungsmoduls in der HELOKA-LP-Anlage.

Breuckmann GmbH & Co. KG, Heiligenhaus, Deutschland Tokamak Energy Ltd., Oxford, Großbritannien

Materialien für zukünftige Fusionskraftwerke zu entwickeln ist für Forscher und Ingenieure die ultimative Herausforderung. Hochtemperatur- und Hochwärme-flussanwendungen wie in der Fusion oder beispielsweise im Metallguss machen neue Ansätze für traditionelle Materialien notwendig – so etwa für das Refraktärmetall Wolfram. Um die intrinsische Sprödigkeit von Wolfram zu überwinden, wird ein faserverstärkter Wolfram-Verbundwerkstoff entwickelt. Indem man hochfeste und duktile Wolframfasern einbringt, können Spannungsspitzen abgebaut werden. Aus spröde wird zäh: das Material ist nun beständiger gegen Risswachstum und Materialversagen. Zwei verschiedene Produktionswege stehen im Mittelpunkt der Untersuchungen: ein pulvermetallurgischer Weg mit zufällig orientierten Kurzfasern und die Produktion durch chemische Phasenabscheidung auf in eine Richtung laufende Langfasern.

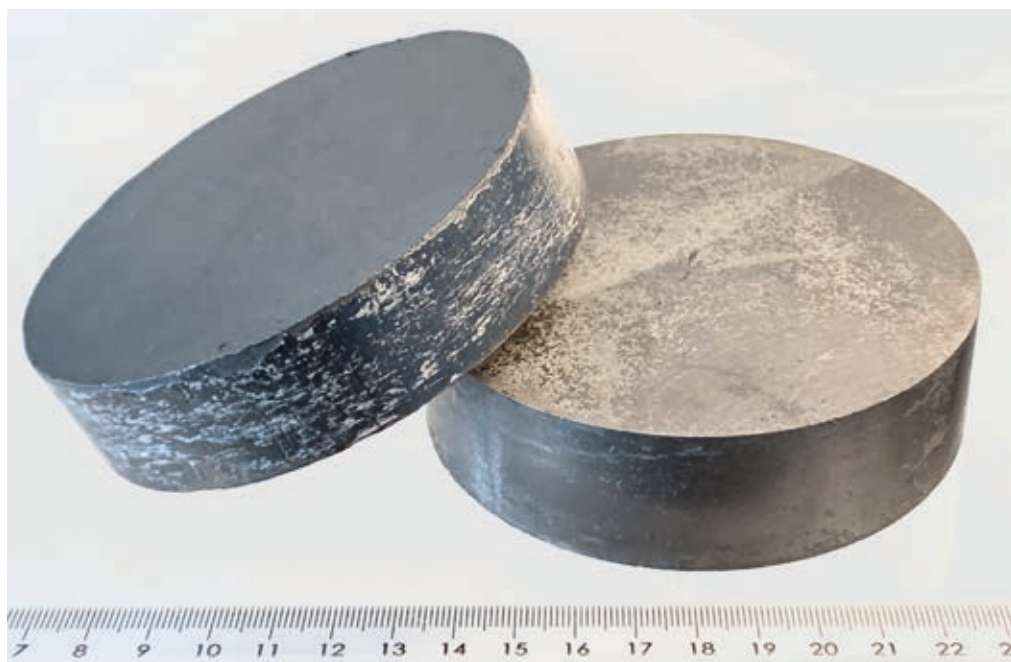


Foto: Y. Mao, IEK-4, Forschungszentrum Jülich

Materialprobe des wolframfaserverstärkten Wolfram-Verbundstoffes mit einer Ausdehnung von 105 mm x 30 mm

Basierend auf einer gründlichen Machbarkeitsforschung der Forschungszentrum Jülich GmbH und Partnerinstitutionen sind die Verbundwerkstoffe nun auf dem Weg zur industriellen Anwendung. Insbesondere die Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie brachte das Thema in die Reichweite der industriellen Produktion. Die Breuckmann GmbH & Co. KG und die Tokamak Energy Ltd. stellten ihre eigenen Anforderungen an die Materialien, z.B. eine hohe Haltbarkeit und noch höhere thermische Leistung. Die erstmalige Herstellung von Proben einer Größe von bis zu 100 Millimetern mit einer hohen Materialdicke wurde durch die Breuckmann GmbH Co. KG im Rahmen des europäischen FUTTA*-Projekts sowie durch Tokamak Energy Ltd. ermöglicht.

Die vielversprechenden ersten Ergebnisse bezüglich der Übertragung der Prozesse in einen industriellen Maßstab und auf alternative Anwendungsfälle öffnen die Tür für die weitere Entwicklung und Etablierung von wolframfaserverstärktem Wolfram.

*FUTTA steht für Fusion Technology Transfer Activities. Das Konsortium unterstützt innovative Projekte in Europa durch die Förderung von Fusionstechnologien und deren Anwendung.

Aus spröde wird zäh Wolframfaserverstärkte Wolfram-Verbundwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen

In Fusionskraftwerken wie DEMO zählt die erste Wand des Plasmagefäßes zu den Schlüsselkomponenten, was die industrielle Herstellung betrifft. Der Grund dafür liegt nicht nur in ihrer beachtlichen Höhe von zehn Metern und ihrer komplexen 3D-Außenkontur, die der Plasmaoberfläche folgt. An der Innenseite der ersten Wand wird ein großer Teil der Strahlungsenergie aus dem Fusionsplasma direkt in Wärme umgesetzt. Kühlkreisläufe leiten diese weiter, damit schließlich Strom erzeugt werden kann. Hierzu muss die dünne erste Wand – das Verhältnis der Wandstärke zur Reaktorgröße im DEMO ist vergleichbar mit dem eines Hühnerreis – vollständig mit engmaschigen Kühlkanälen ausgestattet sein. Zusätzlich sind wegen der Gaskühlung mit Helium die Innenflächen der Kühlkanäle in Bereichen lokaler Lastspitzen mit einer Strukturierung zu versehen – so lässt sich die Wärmeübertragung von der Struktur an das Fluid maximieren.

Will man allen Randbedingungen gerecht werden, so bieten konventionelle Produktionsmethoden kaum Möglichkeiten für eine wirtschaftliche Realisierung. Auch die additive Fertigungstechnik stößt, alleine angewendet, hier an ihre Grenzen. Vielversprechend ist jedoch eine innovative Kombination aus additiver Fertigung durch Metallpulverauftrag (MPA), welcher mittels Überschall-Gasströmung erfolgt (dem sogenannten Kaltgasspritzen), und dem konventionellen Fügeverfahren des heiß-isostatischen Pressens.

Die verwendeten Halbzeuge sind vorgeformte Schalen mit oberflächlich eingefrästen Kanälen sowie Innenstrukturierungen. Sie werden mit Hilfe konventioneller Technologie vorbereitet und danach durch Kaltgasspritzen mit einem patentierten Verfahren der Hermle Maschinenbau GmbH (kurz HMG) verschlossen. Dieses Verfahren ermöglicht es, eine später drucktragende Struktur mittels heiß-isostatischen Pressens zu fügen und somit einen dünnwandigen monolithischen Körper mit einem Minimum an Schweißnähten herzustellen.

Die technische Herausforderung, der sich die HMG stellt, besteht darin, das im Formenbau bereits etablierte Kaltgasspritzen, inklusive Kanalherstellung, auf eine neue Prozesskette und neue Werkstoffe zu übertragen. Erste Demonstrationsteile bestätigen: Die Herstellungssequenz funktioniert. Bevor sie in voller Größe für Kernfusions-Leistungsreaktoren realisiert

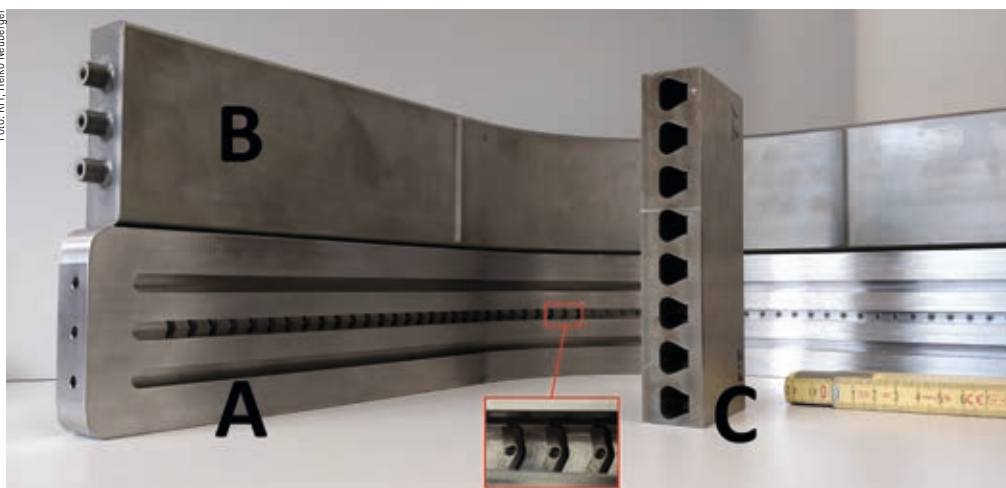
Durch die Beauftragung ist die HMG in der Lage, ihre MPA-Technologie nicht nur hinsichtlich des bestehenden Materialportfolios zu erweitern, sondern auch erste Schritte hin zum Markt der Energieversorgung zu unternehmen. „Als Dienstleister für additive Fertigung sind wir immer auf der Suche nach neuen und anspruchsvollen Anwendungen unserer MPA-Technologie. Freigeformte Kanäle zu erzeugen, anspruchsvolle Stähle zu verarbeiten oder große Bauteile zu fertigen – bei diesem Auftrag können wir alle Stärken unseres Herstellungsverfahrens einbringen und demonstrieren“, so die HMG. „Zusätzlich wird im Rahmen des Forschungsprojektes für die Kernfusion auch neues Wissen hinsichtlich eines Materialaufbaus auf dünnwandige Halbzeuge erarbeitet, wodurch wir weitere Anwendungsfelder für unsere MPA-Technologie erschließen.“

werden kann, wird die Technologie in kleinerem Maßstab Schritt für Schritt in Richtung DEMO weiterentwickelt und vermarktet. Anwendungsfelder bieten hier beispielsweise die Herstellung von Receivern für solarthermische Kraftwerke wie Solartürme oder auch die Produktion von nahtlosen hocheffizienten Wärmetauscherrohren. Europa ist auf dem Weg zu einer CO₂-neutralen Energieversorgung – die neue Technologie kann bereits jetzt zum Übergang beitragen!

Hermle Maschinenbau GmbH, Ottobrunn, Deutschland

HIPpe Überschallfertigung „Überschallfertigung“ mit Kaltgasspritzen für DEMO First Walls

Foto: M.T. Heiko Neubinger



(A) Halbzeug: vorgeformte Schale mit oberflächlich eingefrästen Kanälen inklusive Innenstrukturierung (sog. semi-detached Ribs) im mittleren Kanal
(B) Bauteil nach dem Verschließen der Kanäle mit dem MPA-Verfahren der HMG
(C) Schnitt durch ein Demonstrationsteil

Die MaTeck – Material-Technologie & Kristalle GmbH –, Lieferantin von innovativen Forschungsmaterialien, hat sich unter anderem darauf spezialisiert, metallische Einkristalle zu züchten. Im Rahmen dieses Auftrags erweiterte die Firma ihre Kompetenzen zur Herstellung und Politur von großen, qualitativ hochwertigen Einkristallen. Sie ist jetzt in der Lage, große kundenspezifische Rhodium-Kristalle für verschiedene Anwendungen bereitzustellen.

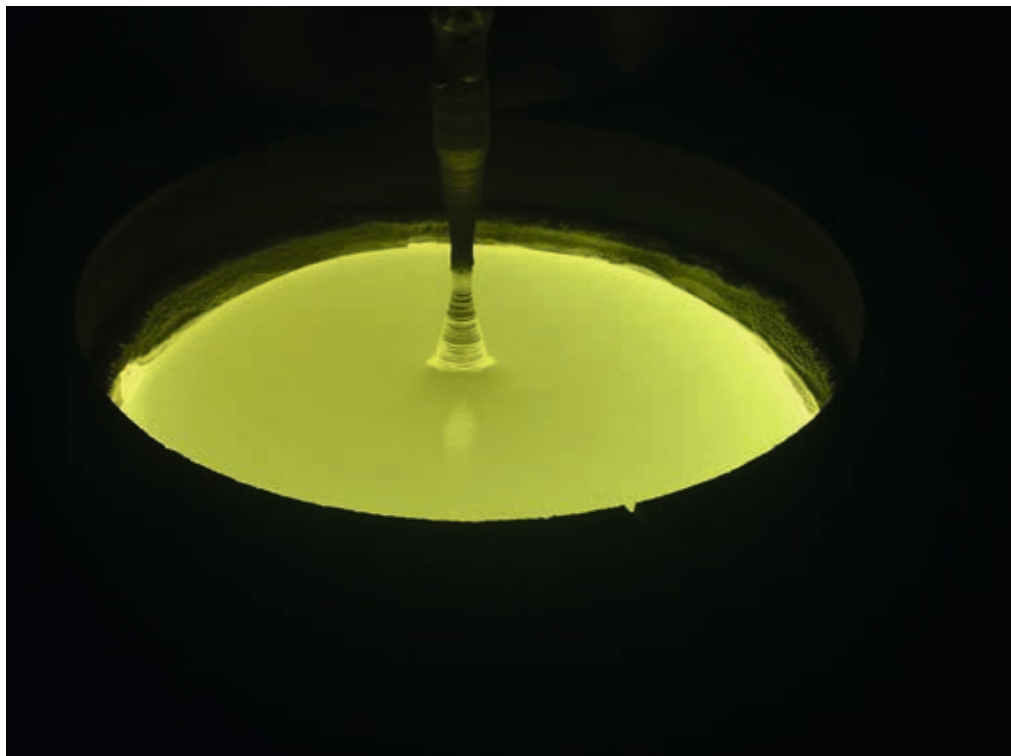
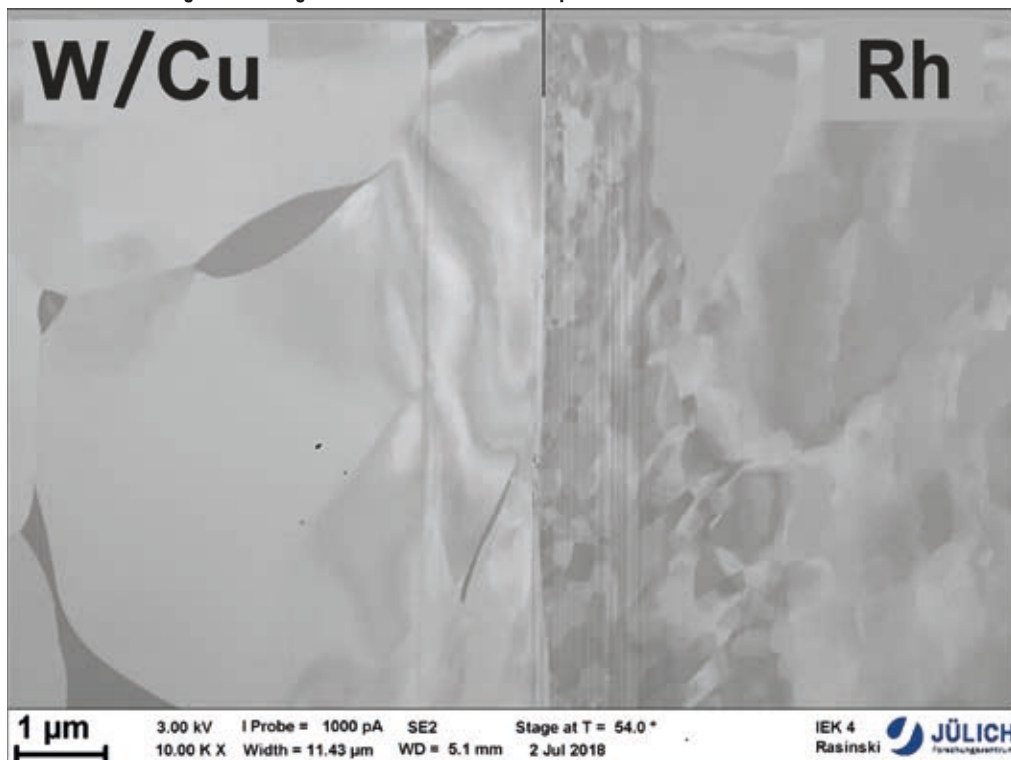


Foto: MaTeck – Material-Technologie & Kristalle GmbH, Jülich

Ein Rhodium-Kristall entsteht: Tiegel mit dem Keimkristall, der in das flüssige Rhodium eingetaucht ist

Kristall-Substrat Fügeverbindung unterm Elektronenmikroskop



Aufnahmen: M. Rasinski, Forschungszentrum Jülich GmbH

MaTeCK – Material-Technologie & Kristalle GmbH, Jülich, Deutschland

Zahlreiche optische Diagnostiken in Fusionsanlagen verwenden komplexe Spiegelsysteme für Messungen im sichtbaren Spektralbereich. Die jeweils vordersten Spiegel dieser Systeme sind dem heißen Plasma während der Messungen zugewandt. Sie müssen extremen Bedingungen widerstehen, zum Beispiel dem Beschuss durch hochenergetische Teilchen oder sehr hohen Wärmeflüssen. Sofern es überhaupt möglich ist, die Spiegel dann und wann zu reinigen, müssen sie die lange Zeit zwischen den seltenen Reinigungsphasen ohne größere Beschädigung überstehen. Zudem dürfen die Spiegel nicht oxidieren, wenn sich Sauerstoff in der Plasmakammer befindet, sei es als Verunreinigung, während Wartungsarbeiten oder durch den seltenen Fall eines Wasserlecks.

Rhodium ist als Spiegelmaterial sehr gut geeignet, insbesondere in monokristalliner und damit in maximal homogener Form. Ist ein Rhodium-Spiegel dem Plasma ausgesetzt, so tritt die unvermeidbare Materialzerstörung gleichmäßiger auf als bei anderen Materialien. Bisher waren jedoch Einkristalle nur in kleinen Dimensionen verfügbar, in einer Größenordnung von zehn Millimetern Durchmesser.

Nach vielen Optimierungsschritten war es so weit: In Zusammenarbeit mit den technischen Fachkräften des Instituts für Energie- und Klimaforschung des Forschungszentrums Jülich, Bereich Plasmaphysik, ist es der Firma MaTeCK gelungen, mit einer entsprechend modifizierten und aufgerüsteten Kristallzüchtungsanlage bei über 2.000 Grad Celsius einen bisher unerreicht großen Rhodium-Einkristall aus der Schmelze zu züchten. Aus diesem Kristall wurde erstmalig ein Einkristall-Musterspiegel mit Abmessungen präpariert, die für die Anwendung realistisch und brauchbar sind, konkret rund 100 mal 50 Quadratmillimeter und dabei einige Millimeter dick. Es wird erwartet, dass Skalierungen der Technik noch größere Einkristall-Spiegel ermöglichen werden. Die einkristallinen Spiegel erfüllen die gestellten hohen optischen Anforderungen: Sie sind gleichmäßig beschaffen und nur wenig porös. Darüber hinaus zeichnen sie sich durch eine exzellente Polierqualität aus; die Rauigkeit liegt unter einem Nanometer.

Ein Spiegel in einer Fusionsanlage benötigt nicht nur eine gut reflektierende Oberfläche, sondern auch einen robusten Spiegelhalter, der zudem wassergekühlt sein muss. Ausschließlich Rhodium für die gesamte Spiegelkomponente zu verwenden – das käme teuer. Im Forschungszentrum Jülich identifizierte man ein passendes Trägermaterial für eine dünne Rhodiumplatte und testete erfolgreich eine geeignete Technik, die beiden Lagen zu verbinden. Mit dem Einkristall Rhodium verfügt die Fusionsforschung nun über eine neue Materialoption, die in den Diagnostik-Spiegelsystemen des Experimentalreaktors ITER in Südfrankreich zum Einsatz kommen kann.

Spiegel aus monokristallinem Rhodium

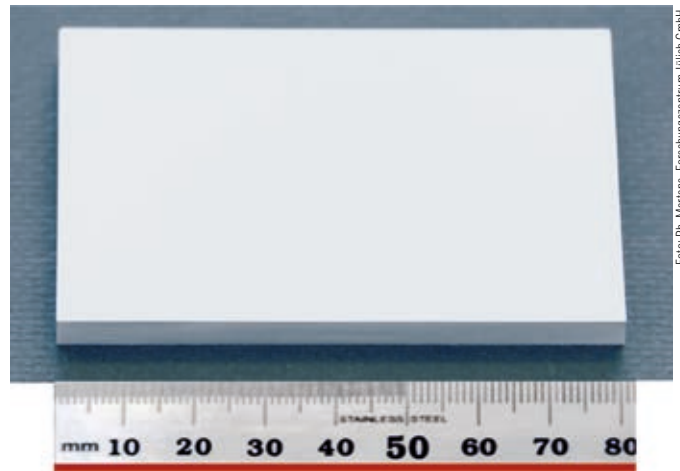


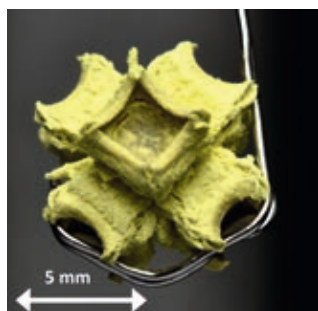
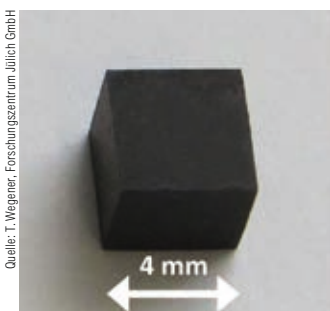
Foto: Ph. Mertens, Forschungszentrum Jülich GmbH

Spieglein, Spieglein an der Wand
Hochbelastbare Spiegel
für optische Diagnostiken
in Fusionsanlagen

Der erfolgreiche Schritt vom Labormaßstab hin zur Produktion größerer Mengen an „Smart Alloys“ ist entscheidend für den möglichen Einsatz solcher Konzepte in zukünftigen Fusionsreaktoren. Für die Zoz GmbH bedeutet dies einen technologischen Zugewinn, der ihre Marktchancen in der Fusionstechnologie besonders bei der Entwicklung von Plasma-zugewandten Materialien und Komponenten wesentlich verbessert. Bereits die ersten Versuche bei der Zoz GmbH, ein intelligentes Pulver herzustellen, unterstützt durch EUROfusion, waren erfolgreich. Damit ist der Weg für die weitere industrielle Anwendung eröffnet.



Foto: Zoz GmbH, Wenden



Quelle: T. Wegener, Forschungszentrum Jülich GmbH

Die intelligenten Legierungen (links) verfügen über eine mindestens zehntausendfach höhere Oxidationsbeständigkeit als reines Wolfram (rechts). Das Bild zeigt Ergebnisse der 10-stündigen Oxidation bei 1000 Grad Celsius in einer Atmosphäre mit 20 Prozent Sauerstoff.

Ein zukünftiges Demonstrationskraftwerk (DEMO) zu entwickeln, stellt Wissenschaftler und Ingenieure vor einzigartige Herausforderungen. Dazu zählt, dass sie für viele Komponenten etablierte Materialien durch neue Materialkonzepte ersetzen müssen, damit diese den extremen Bedingungen standhalten – beispielsweise den hohen Teilchen- und Wärmeflüssen. Wolfram soll wegen seiner günstigen Eigenschaften für die Wände des Plasmagefäßes in künftigen Fusionskraftwerken zum Einsatz kommen. Es hat jedoch den Nachteil, dass es bei einem Lufteinbruch oxidiert und die Oxide die Umgebung schnell kontaminieren. Sogenannte „intelligente“ Legierungen – Smart Alloys – können die Oxidbildung erheblich reduzieren. Dafür werden dem Schwermetall Wolfram leichtere Metalle wie Chrom zugemischt, wodurch die Legierung andere Eigenschaften erhält: Im normalen Plasmabetrieb werden zunächst vorwiegend diese leichten Bestandteile der Legierung zerstäubt, sodass die verbleibende Oberfläche der betroffenen Komponente praktisch aus reinem Wolfram besteht, mit den entsprechend robusten Eigenschaften dieses Materials. Bei einem Lufteinbruch oxidiert jedoch das heiße Wolfram an der Oberfläche. Die verbleibenden leichten



Produktionshalle (links) und Simoloyer® Industrieanlagen bei Zoz GmbH (kleines Bild)



Foto: Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Intelligente
Legierungen
Innovative
Herstellungs-
wege für neue
Materialien

Elemente reichern sich dort wieder an und bremsen die weitere Oxidation der Komponente. Diese intelligenten Legierungen weisen somit eine hohe Oxidationsbeständigkeit gegenüber reinem Wolfram auf.

Das Fusionskraftwerk DEMO benötigt geschätzt 60 Tonnen der einzigartigen oxidations- und plasmabeständigen Legierung. Nach umfangreicher Forschungsvorarbeit und Machbarkeitsstudien muss nun die Smart-Technologie vom Labormaßstab zur Produktionsreife gebracht werden. Auch dafür werden innovative Wege beschritten. Das sogenannte mechanische Legieren ist ein wichtiger Entwicklungsschritt in der Smart-Technologie: Die Legierungselemente Wolfram und Chrom werden durch mechanische Reibung derart stark zusammengepresst, dass eine Legierung bei Raumtemperatur durch rein mechanische Wechselwirkung entsteht. Hierbei kommt die einzigartige Expertise der Zoz GmbH, einer Industriepartnerin des EUROfusion-Konsortiums, zum Einsatz. Die Legierungstechnologie der Firma ermöglicht bereits jetzt sowohl eine Herstellung von einigen hundert Kilogramm des legierten Materials als auch einen kontinuierlichen Legierungsprozess.

**Zoz Group, Wenden,
Deutschland**



Wassergekühlte Portauskleidung



Fotos: NTG Neue Technologien GmbH & Co. KG

NTG Neue Technologien GmbH & Co. KG, Gelnhausen, Deutschland

Kühlendes Kleid für heiße Tage Wärmetauscher für Stutzenrohre

Die Greifswalder Fusionsforschungsanlage Wendelstein 7-X wird weiter komplettiert. Alle Elemente, die mit dem Plasma in Wärmekontakt kommen, werden künftig aktiv mit Wasser gekühlt. Dazu gehören auch die Stutzen, die das Plasmagefäß mit dem Außengefäß verbinden; über diese Zugänge wird das Plasma beobachtet und versorgt. Damit sich die Stutzen nicht unzulässig durch thermische Strahlung aus dem Plasma erwärmen, und mit ihnen der Kryoraum, müssen sie mit wassergekühlten Auskleidungen geschützt werden. Diese Auskleidungen – insgesamt 86 sogenannte „Portliner“ – kommen von der NTG Neue Technologien GmbH & Co. KG.

Die technische Herausforderung, der sich das Maschinenbau-Unternehmen stellte, bestand in der Kombination hoher Leistungseinträge, enger Toleranzen sowie dem Einsatz im Ultrahochvakuum. Die Kühlung ist für einen Leistungseintrag von 50 bis 100 kW/m² ausgelegt und funktioniert nach dem Wärmetauscherprinzip: Das kalte Wasser fließt in vier Millimeter dünnen Rohren, die sich wiederum in acht Millimeter dicken Rohren befinden. Im Zwischenraum der beiden Rohre läuft es wieder zurück. Durch diese Bauweise lassen sich die unterschiedlichen Geometrien der Stutzenauskleidungen – rund, rechteckig oder oval – passgenau für die engen Bauräume von 15 bis 20 Millimetern formen und fertigen.

„Der Auftrag hat uns erlaubt, unsere Fertigungstiefe und Fähigkeiten zu erweitern“, so die NTG Neue Technologien GmbH & Co. KG. Für die Portliner wurden jeweils mehr als 10.000 Vier- und Acht-Millimeter-Rohre abgelängt und deren Enden für das Verschweißen vorbereitet. Das Unternehmen richtete einen Dreharbeitsplatz ein und betrieb diesen teilweise in drei Schichten. Um die Endkappen mit den Acht-Millimeter-Rohren zu verschweißen, schaffte es ein Orbital-schweißgerät an und schulte seine Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen entsprechend. Die Ringverteiler, mit denen das Wasser auf die einzelnen Rohre verteilt wird, und weitere Komponenten der Portliner sind aus Blechen herausgearbeitet. Dazu kaufte NTG eine Wasserstrahlschneidmaschine und integrierte diese in die Fertigung. Für die umfangreichen Tests der Portliner sind darüber hinaus verschiedene Messplätze einstanden, um z.B. Leckagen bei 160 Grad Celsius und 25 Bar Druck im Portliner auszuschließen. NTG: „Von diesen Erweiterungen profitieren wir auch bei anderen Aufträgen. Wir haben jetzt die Möglichkeit, die entwickelte Technik an anderer Stelle zu verwenden.“

Von Nadelöhr zu Nadelöhr Spezialwerkzeuge für die Montage der Wendelstein 7-X-Stützen

Fantini Sud SpA, Anagni, Italien

Über 250 Stahlröhren, sogenannte Stützen, verbinden das Plasmagefäß mit der Außenwelt und durchqueren dabei den tiefkalten Spulenbereich. Sie nehmen Diagnostiken und Antennen zur Plasmaheizung auf und dienen zudem dem Anschluss der Vakuumpumpen sowie der Versorgung und Überwachung von Komponenten im Plasmagefäß. Die Stützen sind zwischen 1,4 und 2,5 Meter lang, haben Durchmesser von 0,1 bis 1 Meter und wiegen zwischen 100 und 1.000 Kilogramm. Für die Montage entwickelte, qualifizierte und lieferte die Firma Fantini Sud drei Rampen. Mit deren Hilfe ließen sich die Stützen mit sechs Freiheitsgraden und einer Genauigkeit von bis zu 1,5 Millimetern ausrichten bzw. einbauen.

Der Auftrag war für Fantini Sud eine Herausforderung: Die Stützen mussten hochpräzise ausgerichtet und eingeführt werden; gleichzeitig mussten große Lasten beherrscht werden. Der Fädelvorgang durch jeweils zwei Nadelöhere, eine Öffnung im Außengefäß und die dazugehörige im Plasmagefäß, sollte wiederhol- und ausgesprochen kontrollierbar sein. Eine flexible Konfigurierung der Rampen und die Austauschbarkeit der Befestigungsschnittstellen für die unterschiedlichen Stützenformen

– rund, oval oder rechteckig – waren ebenfalls gefordert.



Etwa zwei Drittel der Stützen beherbergen Diagnostiken. Eine davon ist eine Laserdiagnostik, mit der sich – durch Streuung von Licht an den freien Elektronen – die Temperatur und Dichte des Plasmas berührungslos messen lassen (Thomson-Streuung).

Diese spezielle Diagnostik ist an einer begehbaren Stützstruktur montiert, die mechanisch vom Plasmagefäß und dem Außengefäß entkoppelt sein muss. So wird die erforderliche millimetergenaue Ausrichtung der Optiken und Laserspiegel nicht beeinträchtigt, während die Anlage in Betrieb ist. Die Stützstruktur ist mit einer turmähnlichen Stahlstruktur im Innenraum des Experimentes verbunden, die zahlreiche Kabel- und Rohrleitungstrassen aufnimmt. Beide Stützstrukturen aus Edelstahl hat die Firma Fantini Sud entworfen, hergestellt, getestet und montiert, und dabei ihre Fachkenntnisse beträchtlich erweitert. Sie war zum damaligen Zeitpunkt eine der ersten italienischen Firmen, die sich nach europäischen Normen dafür qualifizierte und zertifizieren ließ, Stahl- und Aluminiumtragwerke sowie die damit verbundenen Schweißprozesse auszuführen.

Die für diesen Auftrag erforderliche Weiterentwicklung der Design- und Fertigungstechnologien und die hohen Anforderungen an die Qualitätssicherung führten zu einer entscheidenden Weiterqualifikation der Firma, bilden einen wertvollen Erfahrungsschatz und brachten Fantini Sud entsprechende Referenzen. Die Verbesserung auf dem Gebiet der Schweißarbeiten und die Erhöhung des Qualitätsniveaus insgesamt und in allen Fertigungsaspekten waren für das Unternehmensrating strategisch bedeutsam und bereiteten den Weg, die nötige Qualifikation und damit Aufträge von anderen internationalen Kunden wie dem europäischen Kernforschungszentrum CERN, dem europäischen Laserforschungsprojekt ELI und der französischen Firma CNIM zu erhalten.

Stützenmontage



Fotos: IPP, Beate Kemnitz



Foto: IPP, Beate Kemnitz

Schaltstufenracks der Hochspannungs-Gleichstrom-Versorgungsanlage

Ampegon Power Electronics AG, Baden, Schweiz

Hochspannend und ausdauernd Entwicklung einer Hochspannungs-Gleichstrom-Versorgungsanlage

Mit den genannten Verbesserungen – im Rahmen dieses Projektes – haben sich die Hochspannungsanlagen der Ampegon Power Electronics AG auf dem Weltmarkt besser durchsetzen können.

Für die verschiedenen Heizsysteme von Wendelstein 7-X wurde eine 130 Kilovolt Hochspannungs-Gleichstrom-Versorgungsanlage mit einer Gesamtleistung von in zwischen 39 Megawatt Dauerstrichbetrieb entwickelt. Diese Anlage, die jüngst auf mittlerweile zehn Module erweitert wurde, muss die hohen Ansprüche vor allem der Mikrowellenröhren erfüllen. Dazu musste die von Ampegon, vormals Thomson Broadcast, erhältliche Anlage erheblich verbessert werden: Das Ingenieurteam erhöhte den Spannungsbereich und optimierte vor allem die Regelgenauigkeit und die Güte des Gleichstroms, die Restwelligkeit.

Dockweiler AG, Neustadt-Glewe, Germany

Um die stark wärmebelasteten Wandelemente zu kühlen, durchziehen viereinhalb Kilometer Kühlwasserleitung das Plasmagefäß des Wendelstein 7-X. Die komplexe Gestalt des Gefäßes bedingt entsprechend geformte Rohrsysteme, die konventionell nur mit großem Aufwand hergestellt werden konnten. Vor allem das Verschweißen der vielen genau ausgerichteten Verzweigungen kostete extrem viel Zeit. Die Dockweiler AG fand eine Lösung: Sie war in der Lage, sogenannte Aushaltungen mit Winkeln bis zu 60 Grad anzubringen. Mit diesen Aushaltungen lässt sich das Abgangsrohr mittels definierter und hochexakter Orbitalschweißtechnik anfügen.

Dockweiler hat erst mit dem Auftrag für Wendelstein 7-X begonnen, dreidimensionale Rohrleitungen herzustellen. Das Unternehmen eignete sich hierfür neue Vermessungs- und Biegetechnologien an und kaufte Maschinen ein. Darüber hinaus musste es sich erstmals mit den besonderen Qualitätsansprüchen der Ultrahochvakuumtechnik auseinandersetzen. Das dabei erworbene Knowhow hat der Dockweiler AG neue Geschäftsfelder eröffnet: „Wir sind jetzt auch bei ITER tätig. Darüber hinaus werden wir auch für kleinere aber spezielle Komponenten in ähnlichen Bereichen angefragt.“

Stählerne Rohrspaghetti Kühlleitungen für die Einbauten im Plasmagefäß

Kühlrohrsystem des Kryostaten sowie des Plasmagefäßes von Wendelstein 7-X

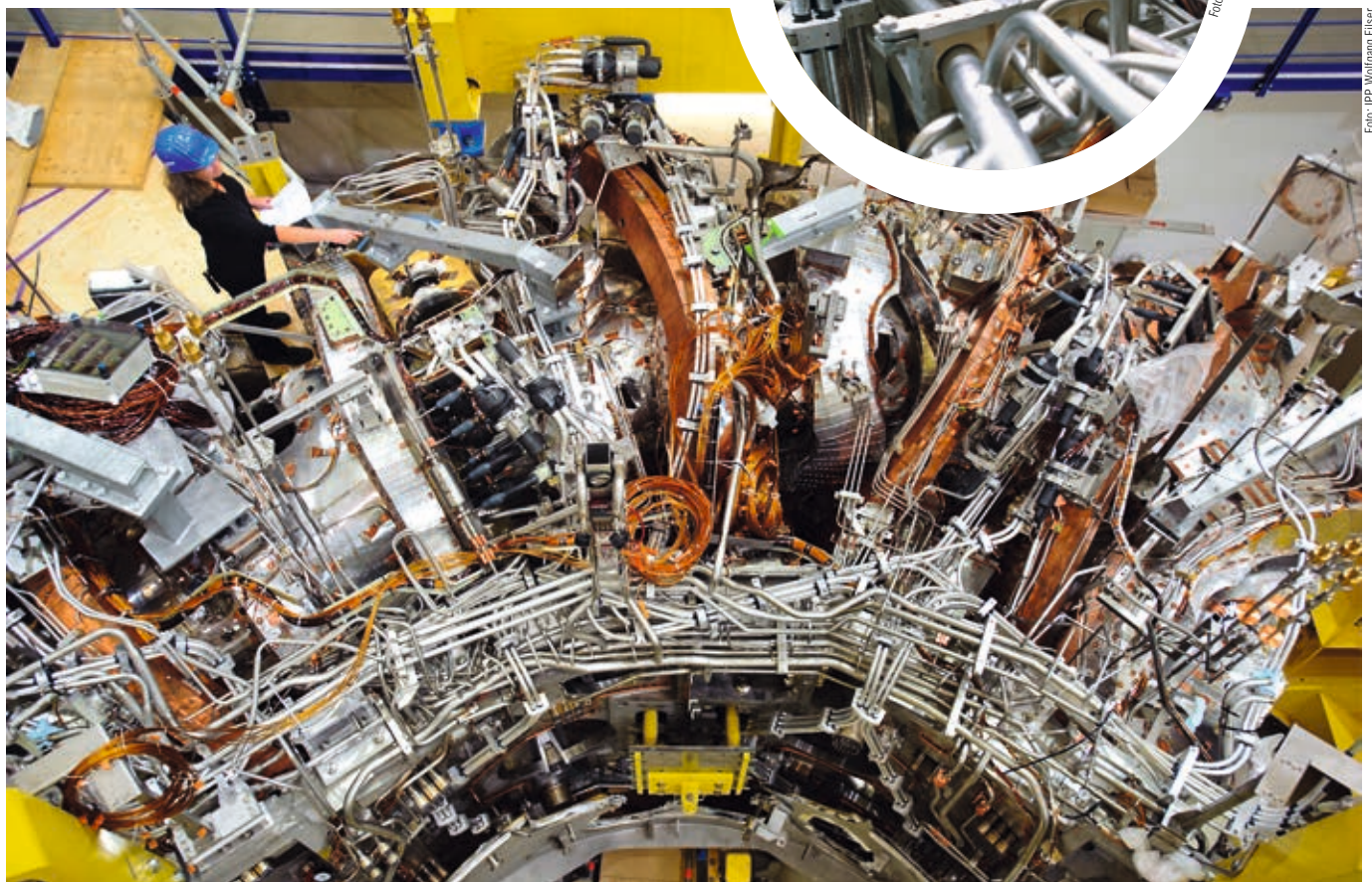


Foto: IPP, Anja Richter, Ullmann

Foto: IPP, Wolfgang Filser

Mikrometer-Präzisionsarbeit Mechanische Bearbeitung des Zentralrings

CLP Srl,
Borgo San Dalmazzo, Italien

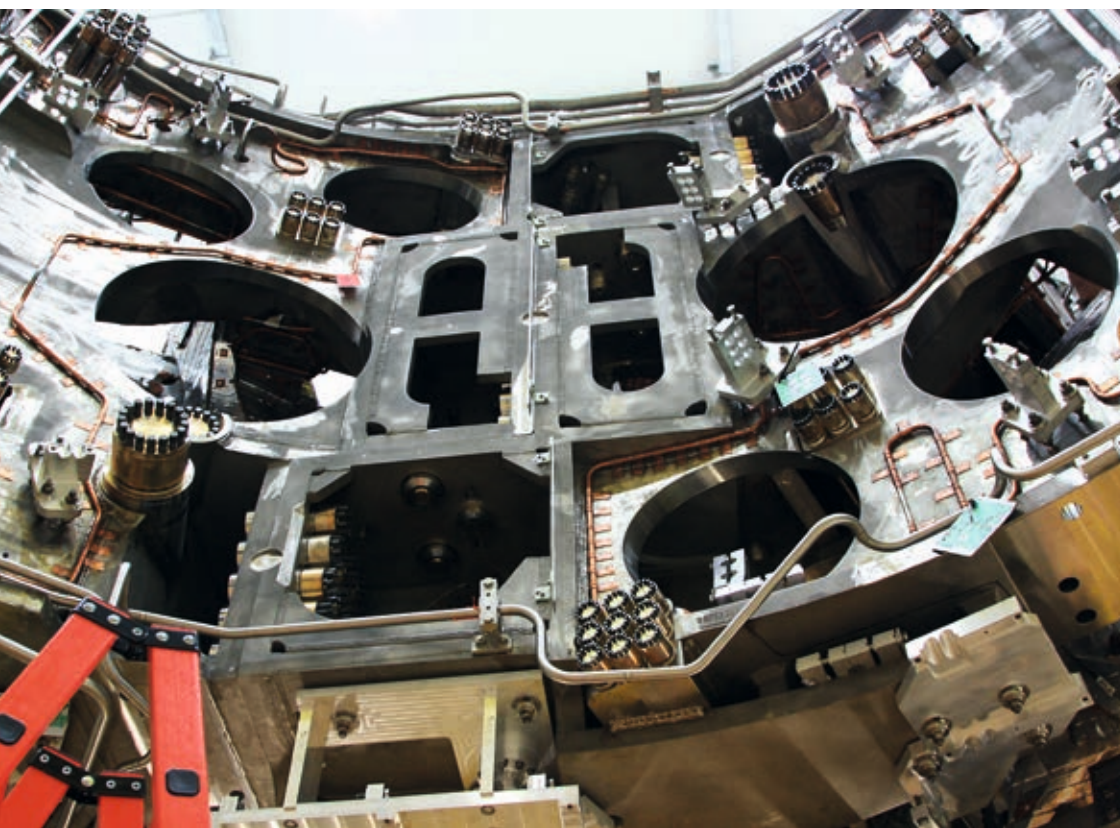


Foto: IPP, Beate Kemnitz

Zentralring des Wendelstein 7-X

Die Arbeiten am Zentralring des Wendelstein 7-X haben der Firma völlig neue Arbeitsbereiche und damit zusätzliche Auftragsfelder erschlossen. Die Vorbearbeitung von Komponenten für die Spulen des internationalen Experimentalreaktors ITER, die Endbearbeitung der Spulen der japanisch-europäischen Fusionsanlage JT-60SA, für die CLP auch die Spulen-Transportkits konstruierte und fertigte – alles Aktivitäten, die sich aus der Zusammenarbeit mit dem IPP ergeben haben.

Die supraleitenden Magnetspulen des Wendelstein 7-X sind an einem massiven Zentralring festgeschraubt. Auf diesen Stahlring wirken Kräfte von circa 100 Tonnen. Deshalb mussten die zehn einzelnen Segmente des Ringes an ihren Schnittstellen extrem genau gefertigt werden. Um die Metallflächen mit einer Genauigkeit von etwa 100 Mikrometern (100 Millionstel Meter) mechanisch bearbeiten zu können, wurden die tonnenschweren und mehrere Meter großen Stahlsegmente zur Firma CLP nach Norditalien transportiert und dort hochpräzise gefräst. Die großen Teile wurden dabei mehrfach umgespannt. Daher musste man spezielle Techniken entwickeln, die trotzdem eine exakte und reproduzierbare Positionierung garantierten. Zusätzlich war eine Thermostatisierung der Werkstätten zu implementieren, um die geforderte Bearbeitungsgenauigkeit zu erreichen. Zum Nachweis dieser Genauigkeit erarbeitete das IPP mit CLP computergesteuerte Vermessungsverfahren. Hinzu kam die gemeinsame Entwicklung spezieller Tiefbohrtechniken für die Verbindung der Segmente untereinander mit langen Schrauben aus Spezialstahl.

Nord-Lock AG, St. Gallenkappel, Schweiz Tempelmann Feinwerktechnik GmbH, Pinneberg, Deutschland



Foto: IPP, Jörg Riemann



Foto: IPP, Jörg Riemann



Foto: IPP, Beate Kemnitz

Wendelstein 7-X: Verschraubung am Zentralring

Selbst die Schrauben sind nicht von der Stange. Hightech-Produkte halten die einzelnen Segmente des Zentralrings von Wendelstein 7-X zusammen, der wiederum – ebenfalls über Schraubverbindungen – die 70 supraleitenden Spulen trägt. Schraubverbindungen gewähren im Vergleich zu Schweißverbindungen eine gewisse Flexibilität. Während des Betriebs von Wendelstein 7-X werden sie stark belastet, zum einen durch die magnetischen Kräfte, zum anderen durch ihren Einsatz bei -270 Grad Celsius. Die Nord-Lock AG, Erfinderin des Superbolt-Systems, lieferte für Wendelstein 7-X Schrauben aus hochfestem Inconel 718 mit Gewindedurchmessern von M20 bis M90 und Längen zwischen 100 und 1.350 Millimetern. Deren Material Inconel 718, von deutlich höherer Festigkeit als im Handel üblich, stammt von der Firma Tempelmann Feinwerktechnik und den BGH Edelstahlwerken Freital. Durch diverse Versuchsreihen, insbesondere bei Tieftemperatur, konnte es Tempelmann prozesssicher herstellen. Besonders das schwer zu zerspannende Inconel 718 zu bearbeiten, hat Mensch und Maschine vor Herausforderungen gestellt.



Fotos: Tempelmann Feinwerktechnik GmbH

Blick in die Drehmaschine: Inconel 718 wird trocken mit Keramikplatten bearbeitet. Rot glühend werden die Späne abgetragen – die Bolzen entstehen.

Schraubenbolzen aus Inconel 718 für das IPP – hochfest und korrosionsbeständig



Geschraubt und nicht geschweißt Weiterentwicklung von Schraubverbindungen

Allerdings erfüllte der Reibungskoeffizient der Schrauben noch nicht die Ansprüche eines Wendelstein 7-X: Je niedriger der Reibungskoeffizient, desto weniger Kraft ist aufzuwenden, um die Schrauben anzuziehen. Daher entwickelte Nord-Lock eine Zweifach-Feststoffbeschichtung. Mit dieser Speziallösung für Wendelstein 7-X und der gleichzeitigen Verwendung von silberbeschichteten Muttern und Druckscheiben sank der Reibungskoeffizient auf 0,06 – zuvor war man mit Spezialschmierstoffen auf 0,12 bis 0,14 gekommen. Bei eventuellen Neumontagen Hunderte Schrauben nachschmieren zu müssen – das konnte man sich nun sparen, denn der erreichte exzellente Wert blieb über mehrere Spannvorgänge konstant. Dank des niedrigen Reibungskoeffizienten waren zudem kleinere Drehmomentschlüssel einsetzbar, was die Montage im äußerst beengten Bau- raum der Fusionsforschungsanlage erleichterte.

Durch die Weiterentwicklung des Superbolt-Systems und damit einhergehend einer neuen Prozedur zum Anziehen der Schraubenmutter können hohe Vorspannungen in kürzerer Zeit erreicht werden. Heute gehört dieses Verfahren bei der Nord-Lock AG zum Standard. Die Tempelmann Feinwerktechnik GmbH sagt: „Diese Grundlagenforschungen haben uns auch für andere Projekte qualifiziert. Somit können wir mit gutem Recht behaupten, ein Spezialist für die Bearbeitung von Inconel im ausgelagerten Zustand zu sein. Die Zusammenarbeit mit dem internationalen Team aus Forschern hat uns im Umgang mit Problemen bereichert, Berührungsängste abgebaut und positiv beeinflusst.“

RASI Maschinenbau GmbH, Illingen, Deutschland

Ein überdimensionaler Kabelbaum Das supraleitende Bussystem für Wendelstein 7-X

Die 70 supraleitenden Spulen des Wendelstein 7-X müssen untereinander und mit den Stromzuführungen elektrisch und hydraulisch verschaltet werden. Dies geschieht durch 124 dreidimensional vorgeformte Supraleiter. Der Supraleiter Niob-Titan ist in dünnen Fasern in Kupferdrähte eingebettet, die zu einem Kabel verseilt wurden. Zwischen diesen Einzeldrähten fließt flüssiges Helium, um die Spulen auf -270 Grad Celsius abzukühlen. Das Kabel selbst ist von einer heliumdichten Aluminiumhülle umgeben. Anders als bei einem gewöhnlichen Kabelbaum, wie man ihn etwa im Auto findet, kann man die Form der Verbindungsleitungen nicht mehr vor Ort anpassen, da das Supraleiterkabel nicht flexibel ist. Vielmehr mussten die Leitungen auf wenige Millimeter genau

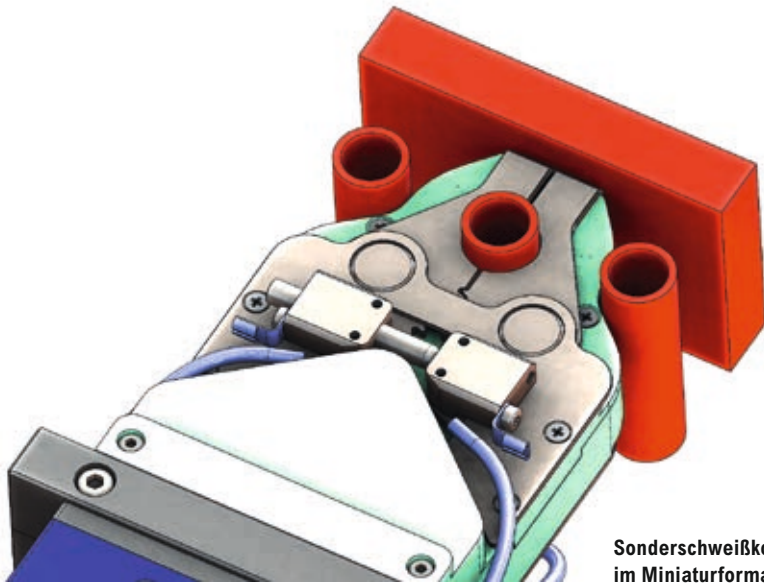
vorgefertigt werden. Dafür musste eine computergesteuerte Biegemaschine qualifiziert werden.

Die Firma RASI hat mit dem Forschungszentrum Jülich eine Maschine entwickelt, die Biegungen in zwei Richtungen erlaubt. Normalerweise erreicht man eine variable Biegerichtung, indem man das Werkstück in der Maschine um seine Achse dreht. Hier allerdings handelte es sich um bereits vorgeformte Teile von mehreren Metern Länge, die beliebig im Raum – auch unter die Bodenebene – geschwenkt hätten. Die neuartige Zwei-Richtungs-Biegemaschine erlaubt immer die Schwenkrichtung nach oben und machte damit die Fertigung überhaupt erst möglich.



Geometrieprüfung der geformten Supraleiter

Die bei der Weiterentwicklung der Produktpalette gesammelten Erfahrungen sind wertvoll für künftige kundenspezifische Entwicklungen des Herstellers. Die neue flexiblere Maschine hat Käufer im Motoren-, Turbinen- und Schiffbau gefunden. Sie ging in Serie.



Sonderschweißkopf
im Miniaturformat

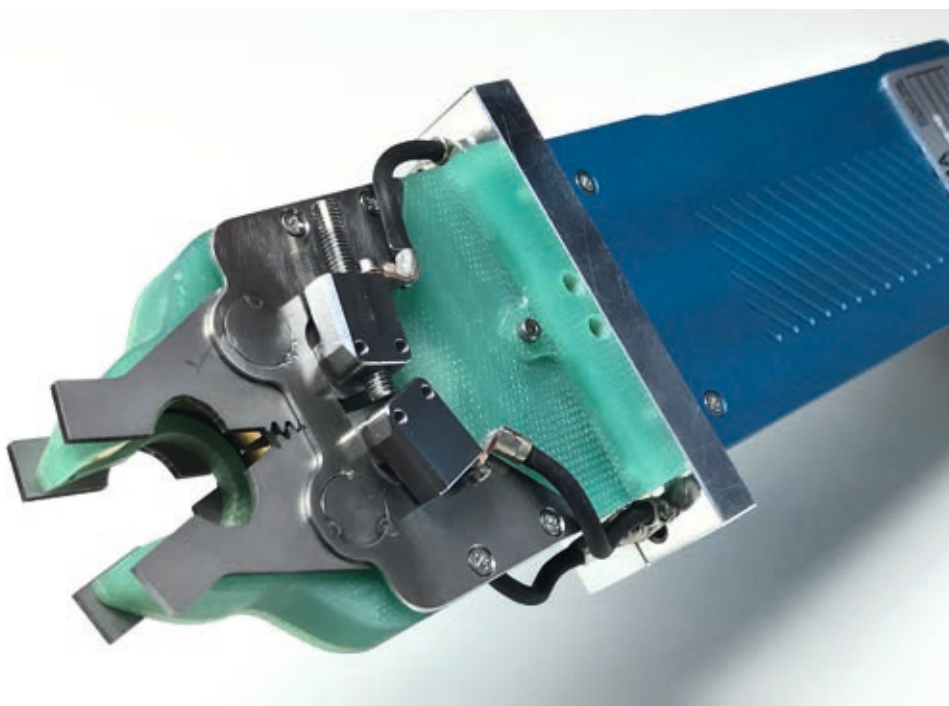
Encoma GmbH, Eigeltingen, Deutschland

Klein, aber oho

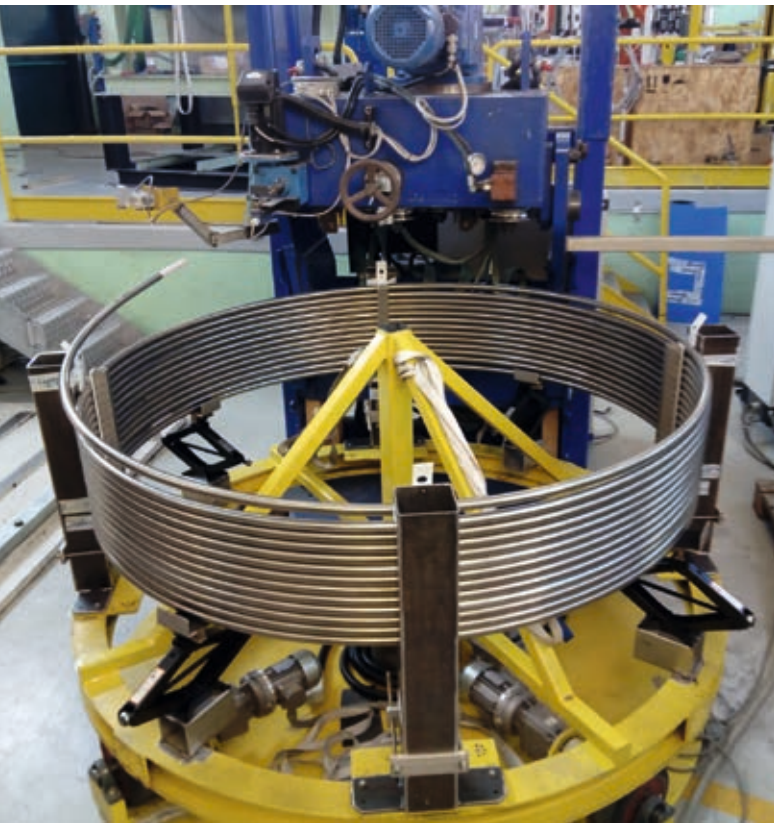
Orbitalschweißkopf für beengte Verhältnisse

An den wandnahen Kühlwasserleitungen der Fusionsanlage Wendelstein 7-X waren hochpräzise Orbitalschweißnähte auszuführen – unter extrem beengten Platzverhältnissen im Plasmagefäß. Der Sondermaschinenbauer Encoma hat hierfür im Jahr 2019 einen Miniaturorbitalschweißkopf mit einem besonders schmalen Rotor und einem seitlich platzsparend und kompakt zu öffnenden Spannsystem entwickelt. Diese neue Bauform erlaubt das Verschweißen von – in Relation zur Baugröße des Schweißkopfes – großen Rohrdurchmessern bei gleichzeitig minimiertem radialen und achsialen Platzbedarf rund um die Schweißnähte.

Die Technologie, deren Entwicklung vom IPP finanziert wurde, steht nun hier wie anderswo anwendungsbereit zur Verfügung. Sie konnte für Schweißungen an Divertor-Rohrleitungssystemen des ITER-Projekts genutzt werden und kommt in Kürze nun auch beim GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt zum Einsatz. In sehr ähnlicher Bauform wird dieses Konzept dem Unternehmen zufolge mittlerweile ebenfalls erfolgreich bei anspruchsvollen Verrohrungen an Reinstgasversorgungsanlagen für Produktionsanlagen in der Halbleiterindustrie eingesetzt.



Tschüss, Platzproblem! Kabelbiegen für ASDEX Upgrade



Produktion des TIC-Leiters

Foto: ICAS

**ICAS-Konsortium,
Frascati, Italien
SeaAlp-Konsortium,
Genoa, Italien**

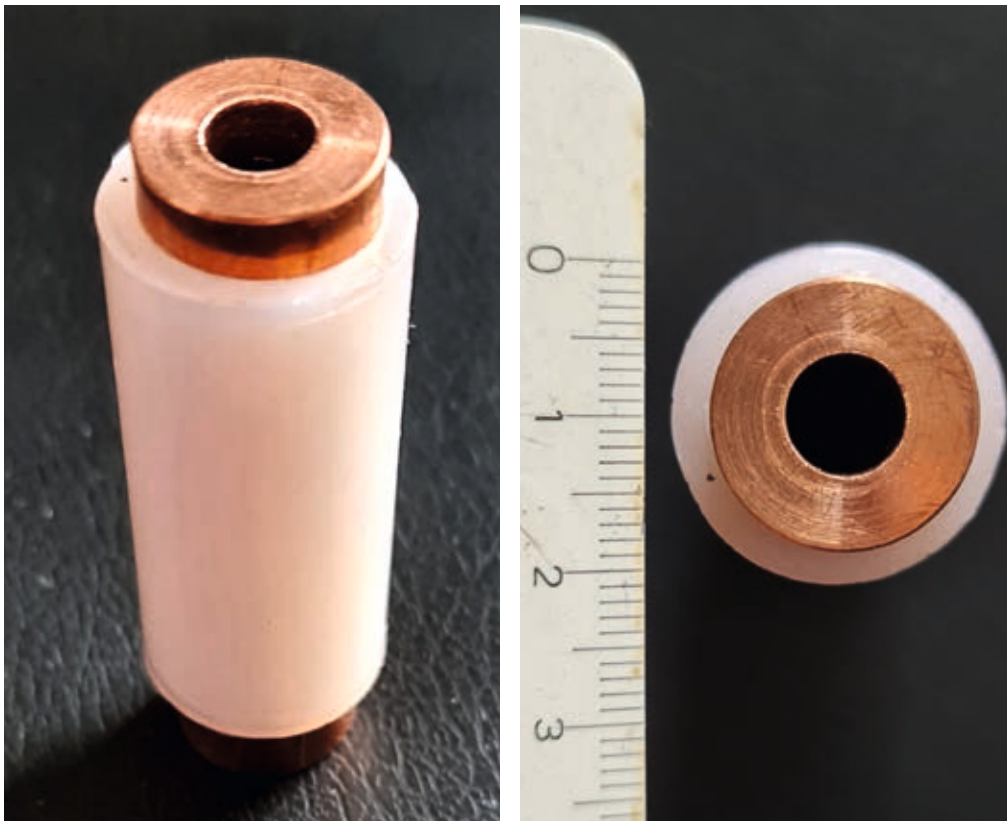
ASDEX Upgrade im Max-Planck-Institut für Plasma-physik in Garching ist das größte nationale Fusions-experiment vom Typ Tokamak in Europa. Um die Wechselwirkung zwischen dem heißen Fusionsplasma und den umgebenden Wänden zu regulieren, ist ASDEX Upgrade mit einem besonderen Bauteil ausgerüstet, mit einem „Divertor“. Ein spezielles magnetisches Feld, das Divertor-Feld, lenkt den äußeren Rand des Plasmas auf robuste, wassergekühlte Platten an der Gefäßwand.

Die Untersuchung „alternativer“ Konfigurationen für das Divertor-Feld ist ein nächster großer Schritt im Forschungs-programm von ASDEX Upgrade. Ziel ist es, die magnetischen Feldlinien im Divertor-Bereich so aufzufächern, dass der Ener-giefluss entlang der Feldlinien über einen größeren Bereich der Gefäßwand verteilt und so die lokale Wärmebelastung der Di-vertor-Platten gesenkt wird.

2016 startete das Projekt zu Entwicklung und Einbau des neuen Divertors. Er wird den „klassischen“ Divertor am Boden des Gefäßes ergänzen und an der Oberseite des Plasmagefäßes lie-gen. Das benötigte Magnetfeld sollen zwei im Plasmagefäß ein-zubauende Spulen erzeugen. Das Produkt aus Spulenstrom und Windungszahl wird bis zu 52 Kiloampere x Windung betragen. Weil außerdem während des Betriebs bei gewissen Störungen in den Spulen Spannungen bis zu einem Kilovolt pro Windung induziert werden könnten, werden an den Spulenleiter beson-dere Anforderungen gestellt: Um Lichtbögen zwischen benach-barten Windungen zu vermeiden, ist der kupferne Leiter in ein Schutzrohr aus Edelstahl eingebettet. Die Isolierung zwischen den wassergekühlten Kupferleitern wird durch eine 2,5 Milli-meter dicke Tefzel- bzw. Teflon-Beschichtung realisiert (Tef-zel-Insulated Conductor, kurz TIC). Das Edelstahl-Schutzrohr wirkt als elektrischer Schutzschirm sowie als Vakuum-Barriere.

Mit einem Durchmesser von 26 Millimetern ist die Steifigkeit des Leiters beachtlich – ähnlich der eines typischen Handlaufs aus Edelstahl. Wegen des begrenzten Zugangs ist es nicht mög-lich, eine komplette Spule in den Vakuumbehälter zu bringen; die Spule muss daher im Gefäß gebogen werden. Infolgedessen sind zwei Aufgaben zu lösen: Erstens die Herstellung eines speziellen, an die Anforderungen von ASDEX Upgrade ange-passten Leiters und zweitens die Entwicklung von Verfahren für das Biegen im Gefäß zusammen mit der Konstruktion der entsprechenden Werkzeuge.

Beide Aufgaben werden in Kooperation mit externen Unter-nehmen bearbeitet. Der TIC-Leiter wurde in Zusammenarbeit mit dem ICAS-Konsortium mit Sitz in Frascati/Italien gefe-rtigt. ICAS besitzt Erfahrung in der Herstellung wassergekühl-ter Leiter mit Edelstahlschutz, elektrisch isoliert mit Keramik



Tefzel-beschichtetes Kupfer – der Leiter ohne den Mantel

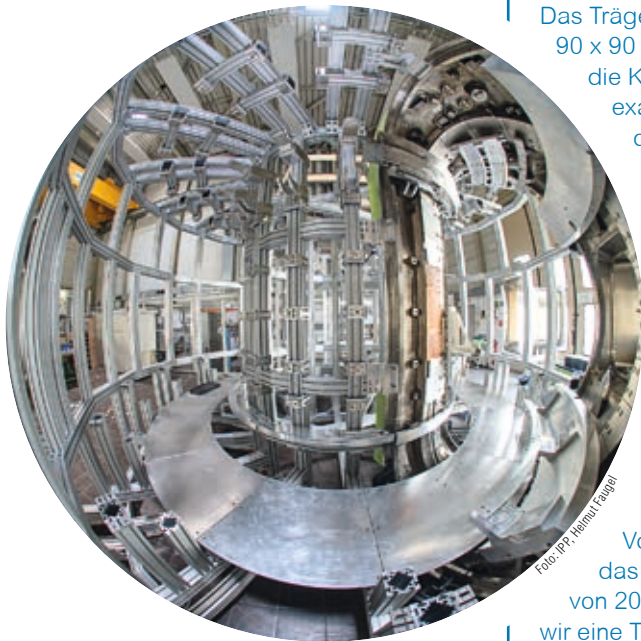
(Magnesiumoxid), wie sie für den internationalen Experimentierreaktor ITER benötigt werden. Der TIC-Leiter für ASDEX Upgrade stellt jedoch neue Anforderungen: Statt Keramik ist Tefzel als Isolationsmaterial verlangt, weil dessen Handhabung im Vergleich zum hygroskopischen Magnesiumoxid wesentlich zuverlässiger ist. Der nun für ASDEX Upgrade entwickelte, qualifizierte und produzierte Leiter kann problemlos auch für andere Fusionsanlagen vergleichbarer Größe, d.h. mit ähnlichem Spulenstrom, eingesetzt werden.

Das SeaAlp-Konsortium mit Sitz in Genua/Italien bündelt Expertise zum Biegen eines Leiters für die Spulherstellung. Die mit Fusionsanlagen wie ITER und dem japanischen JT-60SA gesammelten Erfahrungen mussten jedoch an die spezielle Aufgabe bei ASDEX Upgrade angepasst werden – das Biegen einer Spule innerhalb eines Vakuumgefäßes unter eingeschränkten Platzverhältnissen. Während die größeren Spulen bei ITER oder JT-60SA während des Zusammenbaus der Fusionsanlagen gebogen werden, werden bei ASDEX Upgrade die Spulen erstmals direkt im Gefäß gebogen, d.h. im Inneren einer fertigen Anlage. Ein vergleichbarer Ablauf ist später auch für die Spulenmontage im Plasmagefäß von ITER vorgesehen.

„Durch diese Arbeiten für ASDEX Upgrade haben wir ein spezielles Knowhow zum Wickeln von Spulen im Gefäß aufbauen können, mit besonderem Augenmerk darauf, die Geometrie und die Abmessungen der Wickelwerkzeuge zu optimieren. Wir sind zuversichtlich, dass dieses Wissen neue Geschäftsmöglichkeiten im Bereich der Fusionsenergieprojekte generieren wird“, so das SeaAlp-Konsortium. Für das ICAS-Konsortium erwies sich die Zusammenarbeit mit dem IPP ebenfalls als fruchtbar. Die Verarbeitung der Hochtemperatur-Kupfer-Isolierung auf Teflonbasis zu optimieren, um Verunreinigungen zu vermeiden und die geforderten Toleranzen zu erreichen, oder die Handhabung des isolierten Kupfer-Leiters während des Stahlummantelungsprozesses: Die Anforderungen des Projekts stellten das gemeinsame Team sowohl in der Entwicklungs- als auch in der Produktionsphase vor Herausforderungen. Das neu erworbene Knowhow fließt derzeit in die Produktion der mineralisolierten Edelstahlleiter für das ITER-In-Vessel-Spulen-system ein, so ICAS.

Bauer Profiltechnik GmbH, Neckarwestheim, Deutschland

Werbewirksamer Dummy Profilrahmen-Polygon für Probemontagen – ein zweiter ASDEX Upgrade



Der Montage-Teststand

Die Bauer Profiltechnik, Spezialist für individuell zugeschnittene Arbeitsstationen, hat ein innovatives, 3,5 Meter hohes und 4,5 Meter breites Rahmengestell entwickelt, das die Befestigungspunkte aufnimmt – und hieran die zwei Tonnen schweren Komponenten. Das Trägersystem ist ein 16-eckiges Polygon. Aus 90 x 90 Millimeter starken Profilstreben montierten die Konstrukteure 8 x 32 Verbindungen in einem exakten Winkel von je 11,25 Grad. Von Seiten des IPP war dabei eine Abweichungstoleranz unter einem Millimeter gefordert. „Das Ergebnis ist selbst für uns ein kleines Meisterstück“, resümiert Uwe Wehle, Geschäftsführer der Bauer Profiltechnik, über das werbewirksame Vorzeigeprojekt. „Durch die modulare und strebenartige Bauweise, in der wir das Rahmengestell konstruiert und gefertigt haben, ist das Trägermodell zudem ohne spezielles Werkzeug und verbunden mit einer enormen Zeiterparnis höchst flexibel in der Anpassung, Verstellung oder Erweiterung gestaltet.“

Vom ersten bis zum letzten Arbeitstag wurde das Material durchgängig mit einer Temperatur von 20 Grad bearbeitet. „Auf diese Weise konnten wir eine Toleranzgenauigkeit von 0,5 Millimetern erzielen und das Gestell in Garching bis auf zwei Millimeter genau ausrichten“, so das Unternehmen auf seiner Website. „Mit dem Polygon für das IPP haben wir ein Projekt realisiert, das die weitreichenden Konstruktionsoptionen und Einsatzmöglichkeiten von Profilrahmen-Lösungen veranschaulicht. Solche Sonderanfertigungen können für nahezu jeden Arbeits- und Aufgabenbereich in jeder Branche zur Anwendung kommen und die Prozesse dort optimieren.“

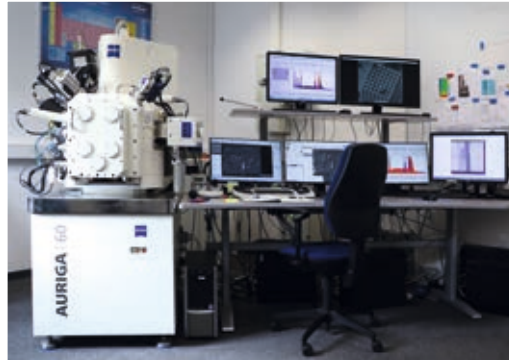


Ein maßgetreues Modell

Ein zweiter ASDEX Upgrade, aber ohne Vakuumgefäß und Spulen: An einem Teststand wird die Montage des neuen Divertors geübt, der ab 2022 in ASDEX Upgrade eingebaut werden soll. Bereits bei früheren Umbauten der Fusionsforschungsanlage hat sich die Erfahrung bestätigt, dass das Erproben von Installationsabfolgen und das probeweise Zusammenfügen von Bauteilen die spätere Montage an ASDEX Upgrade deutlich erleichtert und beschleunigt. Für diese Probemontagen wurde bisher der neunte Oktant genutzt – der Prototyp für die acht Teilstücke oder „Oktanten“, aus denen das stählerne Plasmagefäß von ASDEX Upgrade zusammengesetzt ist. Die Bauer Profilsysteme GmbH hat den neunten Oktanten nun im Auftrag des IPP um die sieben fehlenden Oktanten zu einem Ringgefäß oder „Torus“ ergänzt.

Die sieben neuen Oktanten modellieren den Torus mit Hilfe von Laborprofilen. Diese Aluminiumstreben müssen alle Befestigungspunkte korrekt wiedergeben, die in ASDEX Upgrade vorhanden sind. Die Maßhaltigkeit der Befestigungspunkte ist wichtig, damit die vormontierten Bauteile später auch in ASDEX Upgrade auf die Befestigungspunkte passen. Das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade wurde dazu mit Hilfe eines taktilen Messarms vermessen. Die Daten wurden mit den Messprotokollen aus der Fertigung der Oktanten verglichen. So entstand ein „Ist“-Datensatz für die Befestigungen, der auch die Montageungenauigkeit des Vakuumgefäßes von ASDEX Upgrade berücksichtigt. Nach diesem Datensatz wurden die Befestigungspunkte im Teststand eingestellt. Seit Anfang 2020 werden dort nun die Teile des neuen oberen Divertors montiert. Für künftige Vorhaben, die man jetzt noch nicht kennt, garantiert das neue Trägersystem maximale Flexibilität – eine weitere Investitionsanforderung des IPP.

Schwerlasttisch für
ein Standard-REM.
Das Zahnrad gehört
nicht zum Tisch. Es
symbolisiert eine
Probe von circa zehn
Kilogramm, die im
Mikroskop (Bild rechts)
untersucht werden soll.



Kammrath & Weiss GmbH, Schwerte, Deutschland Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen, Deutschland

Die Rasterelektronenmikroskopie erlaubt oberflächenmorphologische Analysen bis in den Nanometerbereich. Ein typischer Anwendungsfall im IPP ist die Untersuchung plasmaexponierter Komponenten. An diesen betrachten Materialwissenschaftler jeweils die exakt gleiche Stelle – vor und nach einer Belastung. Die Komponenten, etwa eine Divertorkachel aus der Fusionsforschungsanlage ASDEX Upgrade oder ein verlötetes Bauteil mit Wasseranschlüssen, müssen hierzu im Mikroskop bewegt werden können. Zu diesem Zweck hat das IPP ein Standard-Rasterelektronenmikroskop (SEM) von Zeiss mit einer sonderangefertigten Schwerlast-Probenbühne erworben. Ferner ist ein fokussierter Ionenstrahl in das SEM integriert, mit dessen Hilfe sich Querschnitte auf Mikrometerskala präparieren lassen.

Die Probenbühne muss es erlauben, jeden Punkt einer Divertorkachel (230 x 105 Quadratmillimeter) auch in gekipptem Zustand mit einer Genauigkeit von fünf Mikrometern wiederanzufahren; die Drift soll weniger als 100 Nanometer pro fünf Minuten aufweisen. Bei einer maximalen Last von zehn Kilogramm muss eine Auflösung von besser als zehn Nanometern im Elektronenbild erreicht werden. Weitere Spezifikationen der Schwerlastbühne, die die Kammrath & Weiss GmbH im Auftrag von Zeiss fertigte, waren das Kippen von -15 bis +70 Grad, das Rotieren um 360 Grad und der Höhenverfahrweg von 100 Millimetern.



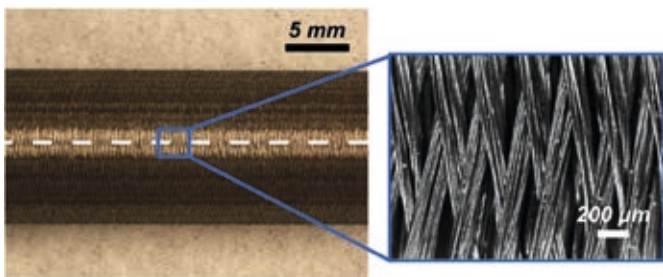
Foto: Kammrath & Weiss GmbH

Kein Hersteller von Rasterelektronenmikroskopen führt einen Standardtisch im Angebot, mit dem sich eine zehn Kilogramm schwere und bis zu 230 Millimeter lange Probe so unter dem Elektronen- und Ionenstrahl bewegen lässt, dass im Mikrometer- bzw. Nanometer-Bereich gearbeitet werden kann. Hochpräzise in der Anfahr Genauigkeit, drift- und vibrationsarm – die Kammrath & Weiss GmbH, Spezialist für Mikroskopie-Sonderlösungen, sah es als Herausforderung, Spezifikationen zu garantieren, von denen nicht klar war, ob sie erreicht werden können. „Mit der erfolgreichen Umsetzung des Tisches haben wir viel Erfahrung gesammelt, was den mechanischen Aufbau und die Ansteuerung des Tisches angeht“, so das Fazit der Firma. „Für uns ist es ein Referenzprojekt, weil wir zeigen konnten, was mit einem Standard-REM möglich ist, wenn wir es mit unserem Produkt veredeln.“

Eine erstklassige Ergänzung Schwerlasttisch für Rasterelektronenmikroskop

TEC-KNIT CreativCenter für Technische Textilien GmbH, Rhede, Deutschland Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung, Denkendorf, Deutschland

Sowohl die TEC-KNIT CreativCenter für Technische Textilien GmbH als auch die Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung haben im Rahmen der Beauftragung durch das IPP hinsichtlich der Verarbeitung von feinen Metallfasern neue Kompetenzen aufgebaut und dementsprechend ihr Portfolio erweitern können. Dies versetzt diese Auftragnehmer nun in die Lage, in diesem Feld weitere Aufträge anzunehmen und das gewonnene Knowhow auch in die Entwicklung von Produkten für andere Anwendungen einfließen zu lassen.



Geflecht aus Wolframgarn; die einzelnen Filamente haben einen Durchmesser von gerade einmal 20 Mikrometern



Herstellung eines Geflechts aus Wolframdraht

An bestimmten Stellen im Plasmagefäß eines zukünftigen Fusionskraftwerks, an denen das heiße, magnetisch vor den Wänden in Schwebelage gehaltene Plasma mit dem Gefäß in Berührung kommt, müssen Wandkomponenten hohen thermomechanischen Belastungen standhalten. Für das Design derartiger Komponenten werden daher leistungsfähige und schadenstolerante Hochtemperaturmaterialien benötigt. Vor diesem Hintergrund werden derzeit metallische Verbundwerkstoffe, in denen haarfeine und hochfeste Wolframdrähte als Verstärkungsphase zum Einsatz kommen, als vielversprechende Hochleistungswerkstoffe angesehen. Um aus derartigen Verbundwerkstoffen Bauteile herstellen zu können, müssen die Wolframdrähte allerdings zunächst zu geeigneten Vorformen, z.B. Geweben oder Geflechten, verarbeitet werden. Die haarfeinen Wolframfasern sind dünn und damit flexibel – das macht es prinzipiell möglich, hierfür textiltechnische Verfahren zu nutzen.

Die TEC-KNIT CreativCenter für Technische Textilien GmbH entwickelt eigentlich keine Garne, sondern hochfunktionale Textilien. Im Auftrag des IPP fertigte sie dennoch Wolframdrahtvorformen an. Sie setzte eine Laboranlage zur Garnherstellung erfolgreich für superdünne Wolframdrähte mit einem Durchmesser von gerade einmal 20 Mikrometern ein. Die auf diese Weise produzierten Multifilamente wurden anschließend von den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung zu Vorformen weiterverarbeitet, mit denen sich Verbundwerkstoffe herstellen lassen. Dabei wurde insbesondere das Rundflechten erfolgreich auf Wolframdrähte und -garne angewandt, um Vorformen für Kühlrohre herzustellen, die in thermisch hochbelasteten Komponenten zum Einsatz kommen sollen.

Einmal flechten, bitte!
Vorformen aus haarfeinem und hochfestem Wolframdraht für Hochleistungsverbundwerkstoffe

Louis Renner GmbH, Bergkirchen, Deutschland

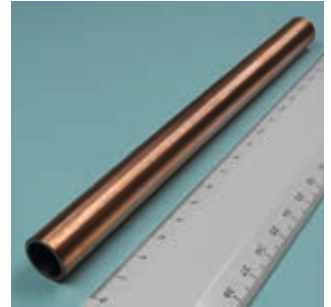
An einigen besonders belasteten Partien des Plasmagefäßes müssen Wandkomponenten in einem Fusionskraftwerk dem Beschuss durch schnelle Plasmateilchen und damit hohen Wärmeflüssen standhalten. Derartige Komponenten werden auf stationäre Wärmeflussbelastungen von bis zu 20 Millionen Watt pro Quadratmeter ausgelegt. Da Wolfram, das derzeit bevorzugte plasmabelastete – d.h. dem Plasma direkt zugewandte – Material, aufgrund seiner Sprödigkeit in solchen Komponenten nicht als Strukturmaterial eingesetzt werden kann, werden dafür kupferbasierte Materialien verwendet. Dies liegt vor allem an der guten Duktilität sowie der hohen Wärmeleitfähigkeit von kupferbasierten Werkstoffen. Strukturmaterialien in Wandkomponenten von Fusionsanlagen müssen allerdings auch eine hohe Warmfestigkeit aufweisen. Vor diesem Hintergrund werden derzeit metallische Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe als vielversprechende Materialien für diese Anwendung angesehen. Derartige Materialien lassen sich aufgrund der metallurgischen Verträglichkeit mittels Kupfer-Schmelzinfiltration von porösen Wolframkörpern herstellen. Dabei füllt über den Schmelzpunkt hinaus erhitztes Kupfer die Lücken in den porösen Wolfram-Strukturen aus.

Im Rahmen der Beauftragung der Louis Renner GmbH durch das IPP wurde die industrietaugliche Herstellung von verschiedenen Wolfram-Kupfer-Verbundmaterialien erprobt. Darüber hinaus wurden auch Komponenten-Mockups hergestellt, die anwendungsnahen und relevanten Wärmeflusstests unterzogen werden konnten. Die Ergebnisse dieser Hochwärmeflusstests bestätigen die Leistungsfähigkeit der hergestellten Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe im Hinblick auf Anwendungen in thermisch hochbelasteten Komponenten.

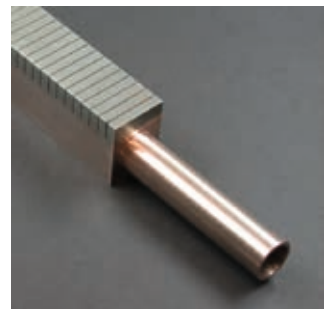
Und der Innovationspreis geht an... Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe für Hochwärmeflussanwendungen

Die Louis Renner GmbH hat als Hersteller von Produkten aus Refraktär- und Verbundmetallen Knowhow aufbauen können, mit dem bestehende Herstellungsverfahren und Produkte hinsichtlich Reinheit und Materialeigenschaften optimiert werden konnten. Die von Louis Renner im Auftrag des IPP hergestellten Verbundwerkstoffe gehen in vielerlei Hinsicht über den derzeitigen industriellen Stand der Technik hinaus, weshalb sich für derartige Materialien in der Zukunft neue Anwendungsmöglichkeiten ergeben können.

Im Jahr 2019 wurde der Innovationspreis des Deutschen Kupferinstitutes an einen IPP-Wissenschaftler für Entwicklungsarbeiten zu Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffen verliehen. Dabei würdigte das Preiskomitee, dass die am IPP durchgeführten Arbeiten „einen wegweisenden Beitrag für die Entwicklung innovativer Produkte aus Kupfer und Kupferlegierungen“ darstellen. Der jährlich verliehene Innovationspreis des Deutschen Kupferinstitutes ist ein Förderwettbewerb für Studenten, Doktoranden und wissenschaftliche Mitarbeiter aus allen Bereichen der Ingenieur- und Naturwissenschaft in Forschung und Industrie. Die eingereichten Arbeiten werden von unabhängigen Juroren aus der kupferverarbeitenden Industrie und der Forschung bewertet. Das Deutsche Kupferinstitut, ein technisch-wissenschaftlicher Berufsverband, wurde 1927 gegründet; derzeit wird es von 26 Mitgliedsunternehmen getragen.



Rohr aus wolframfaserverstärktem Kupfer-Verbundwerkstoff, hergestellt mittels Kupfer-Schmelzinfiltration eines Wolframfaser-Geflechtes



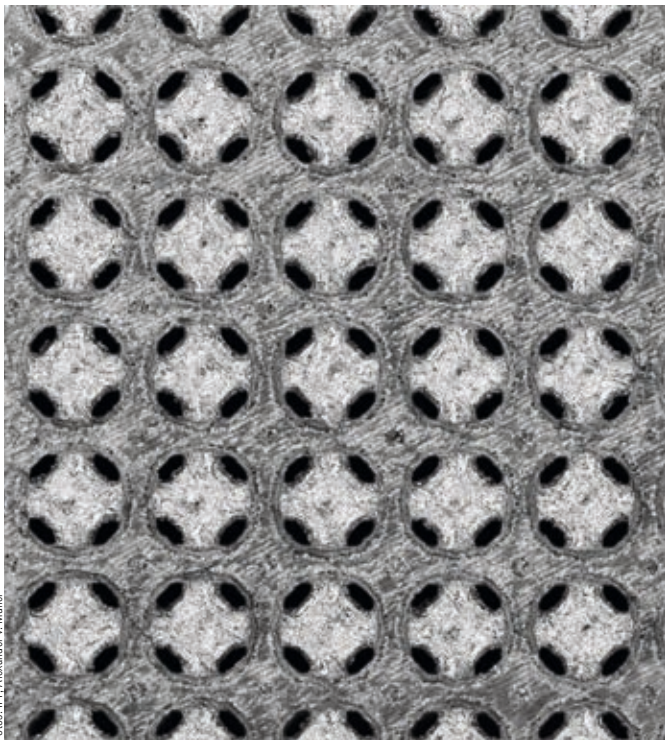
Mock-up einer plasmabelasteten Komponente mit einer Wärmesenke aus wolframpartikelverstärktem Kupfer-Verbundwerkstoff



Mock-up einer plasmabelasteten Komponente mit einer Wärmesenke, welche auf einer mit Kupfer infiltrierten Wolfram-Wabenstruktur basiert

Fotos: IPP, Alexander v. Müller

Aus dem 3D-Drucker Additive Fertigung von Wolfram mittels selektivem Laserstrahlschmelzen



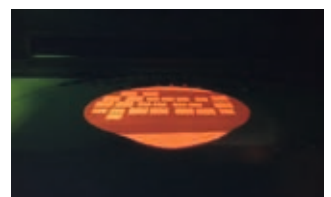
Fotos: IPP, Alexander v. Müller

**Mikroskopische Draufsicht
auf eine additiv gefertigte Gitterstruktur aus Wolfram**

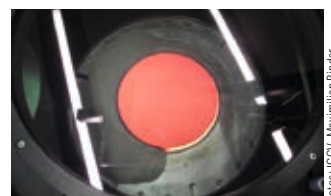


**Additiv gefertigte Wolfram-Teile nach dem Herstellungsprozess
bei der Entnahme aus dem Pulverbett**

Wolfram und andere Refraktärmetalle durch additive Fertigungsverfahren zu verarbeiten, hat sich am Fraunhofer IGCV zu einer Kernkompetenz entwickelt. Die Verarbeitung von Wolfram mittels Laserstrahlschmelzen ist mit einigen Hürden verbunden, die im Laufe der Zusammenarbeit identifiziert und weitestgehend überwunden wurden. Aufgrund der hohen Materialdichte und der Möglichkeit, komplexe Geometrien herzustellen, ergibt sich ein interessantes Anwendungsfeld im Bereich der Strahlungsoptiken für bildgebende Verfahren in der Medizin. Hier konnte das Fraunhofer IGCV bereits neue Partnerschaften knüpfen. Ein weiterer vielversprechender Anwendungsfall sind Raumfahrtantriebe.



**Vorgeheizte Bauplattform aus
Wolfram während des additiven
Herstellungsprozesses**



Fotos: IGCV, Maximilian Binder

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik, Augsburg, Deutschland

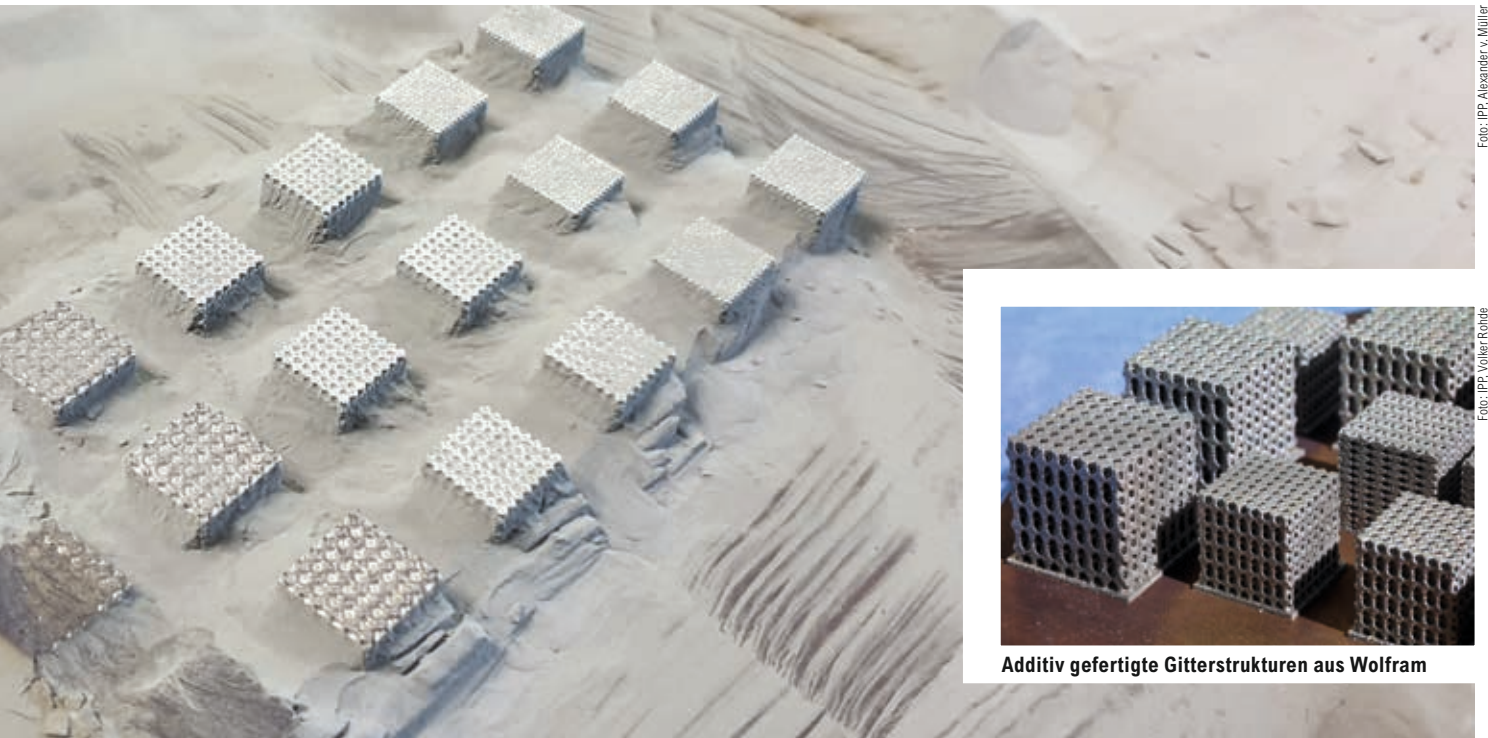


Foto: IPP, Alexander v. Müller

Foto: IPP, Volker Rohde

Additiv gefertigte Gitterstrukturen aus Wolfram

Wolfram, das Metall mit dem höchsten Schmelzpunkt, wird derzeit als unmittelbar plasmabelastetes Material für Wandkomponenten in Fusionsanlagen favorisiert. Dies ist vor allen Dingen durch die Widerstandsfähigkeit und Erosionsbeständigkeit dieses Metalls gegen aufprallende schnelle Plasmateilchen bedingt. Wolfram ist jedoch auch ein sehr hartes und intrinsisch sprödes Metall. Deshalb ist es verhältnismäßig schwierig, Bauteile aus Wolfram herzustellen und zu bearbeiten. Mit diesem Umstand gehen außerdem auch konstruktive Einschränkungen bei der Gestaltung von Wolframbauteilen einher. Neuartige Verfahren der additiven Fertigung („3D-Druck“) von Metallen eröffnen hier gänzlich neue Möglichkeiten der Gestaltungsfreiheit. In Anbetracht dieser Tatsache birgt die additive Fertigung von Wolfram erhebliches Potential, nicht nur für die Fusionstechnologie, sondern auch hinsichtlich zahlreicher Anwendungen, die von den herausragenden Eigenschaften des Refraktärmetalls Wolfram profitieren könnten – oder dadurch erst möglich werden.

Das Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) hat für das IPP geeignete Herstellungsparameter für das selektive Laserstrahlschmelzen von Wolfram auf verschiedenen Laserstrahlschmelzanlagen erarbeitet. Es investierte in spezielle Anlagentechnik, mit der hohe Vorheiztemperaturen realisiert und damit zur Sprödigkeit neigende Metalle, wie z.B. Wolfram, mit hoher Materialqualität „gedruckt“ werden können. Darüber hinaus wurde die Herstellung komplexer Wolframstrukturen demonstriert, wie etwa filigrane Gitterstrukturen, die für spezielle plasmabelastete Komponenten in Fusionsanlagen von Interesse sind.

Spröde war gestern Wolframfaser- verstärktes Wolfram

Querschnitt durch wolframfaserverstärkten Wolfram-Verbundwerkstoff: Er wurde durch ein neuentwickeltes Verfahren hergestellt, die chemische Gasphaseninfiltration von Wolfram. Die kreisförmigen Strukturen mit 150 Mikrometer Durchmesser sind Querschnitte durch die Fasern.

Im Elektronenmikroskop: Wolframfaserverstärktes Wolfram nach Bruchtest – Siegerfoto in der „NuMart Image Competition“. Der im IPP entwickelte Verbundwerkstoff besitzt erhöhte Bruchzähigkeit.



Osram GmbH, Schwabmünchen, Deutschland Archer Technicoat Ltd., High Wycombe, Vereinigtes Königreich

Mit seiner einzigartigen Kombination von Materialeigenschaften ist Wolfram ein vielversprechender Kandidat für Wandkomponenten, die in einem zukünftigen Fusionskraftwerk dem Plasma direkt zugewandt sind. Nachteilig ist jedoch die Sprödigkeit des Materials, das bei Belastung brüchig und schadensanfällig wird – ein Problem, das die Nutzung erheblich einschränkt. Ein möglicher Lösungsansatz ist, im Wolfram Strukturen zu schaffen, die eine lokal auftretende Spannung verteilen und so eine Art Zähigkeit gewähren können, also einen erhöhten Widerstand gegenüber Versagen. Diese von außen eingebrachte Zähigkeitssteigerung oder „Pseudoduktilität“ lässt sich zum Beispiel durch eingebettete Fasern erreichen, die sich bildende Risse überbrücken, ablenken oder sich plastisch verformen. Ein erfolgreiches Beispiel für dieses Konzept sind keramikfaserverstärkte Keramiken. Im Rahmen

von Forschungsarbeiten wurde diese Idee im IPP auf Wolfram übertragen. Dabei wird das Metall mit beschichteten Fasern aus gezogenem Wolframdraht verstärkt. So entsteht ein widerstandsfähiger Verbundwerkstoff.

Um die Eigenschaften und Wirkung der verwendeten Drähte im Verbundwerkstoff zu optimieren, band das IPP die OSRAM GmbH als einen Hersteller von Wolframdrähten in die Entwicklungsarbeiten ein. Zudem beauftragte das IPP die Firma Archer Technicoat damit, ein Herstellungsverfahren mittels chemischer Gasphasen-Infiltration zu erproben, mit dem größere und reproduzierbare Mengen des Verbundwerkstoffs hergestellt werden können. In einem Folgeauftrag lieferte die Archer Technicoat Ltd. ihre erste kommerzielle Anlage für Wolfram-Gasphasen-Infiltrationen an das Forschungszentrum Jülich.

Die Zusammenarbeit zwischen dem IPP und der Osram GmbH hat dazu beigetragen, den Wolframdraht-Werkstoff noch leistungsfähiger zu machen. Das öffnet Osram neue Geschäftsfelder über bestehende Einsatzgebiete im klassischen Hochtemperaturbereich hinaus. Hochfeste und duktile Wolframdrähte haben sich in jüngerer Vergangenheit nicht nur als Fasern für Verbundwerkstoffe in der Fusionsforschung als vielversprechend herausgestellt, sondern sind auch für andere Hightech-Anwendungen mit extremen Anforderungen von großem Interesse. Darüber hinaus konnte die Archer Technicoat Ltd. Knowhow zur Gasphasen-Abscheidung von Wolfram auf beschichteten Wolframfasern und Geweben erarbeiten. Dadurch konnte diese Firma ihr Portfolio ebenfalls erweitern. Sie hat in der Zwischenzeit weitere Arbeiten und Aufträge mit verschiedenen Projektpartnern zum Thema Gasphasen-Infiltration von porösen Wolframsubstraten akquiriert und durchgeführt.

Imprint

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Boltzmannstraße 2 | 85748 Garching | +49 89 3299-01
www.ipp.mpg.de | info@ipp.mpg.de

Teilinstitut Greifswald

Wendelsteinstraße 1 | 17491 Greifswald | +49 3834 88-1203
www.ipp.mpg.de | info@ipp.mpg.de

Karlsruher Institut für Technologie

Kaiserstraße 12 | 76131 Karlsruhe | +49 721 608-0
info@kit.edu | www.fusion.kit.edu

Forschungszentrum Jülich GmbH –

Institut für Energie- und Klimaforschung

Leo-Brandt-Straße | 52428 Jülich | +49 2461 61 1417
fusion@fz-juelich.de | www.fz-juelich.de/iek/iek-4/DE.html

Aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2022

Foto Titel- und Rückseite: Jan Michael Hosan

This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.

