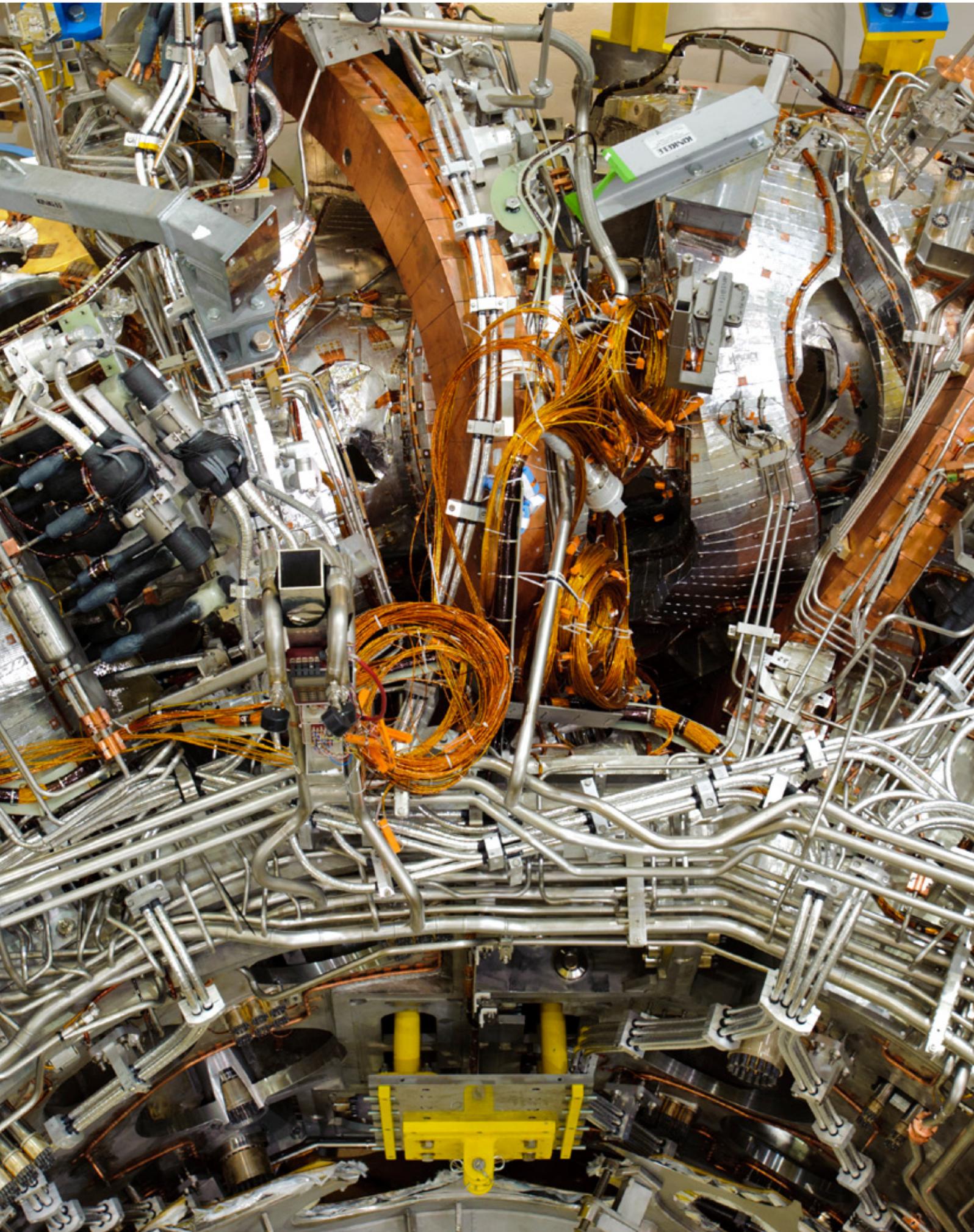




Wendelstein 7-X und die Fusion

An der Grenze des technisch Machbaren



An der Grenze des technisch Machbaren

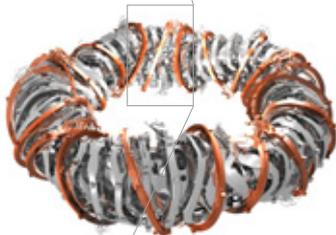
Wie profitieren Industrieunternehmen von Aufträgen für die Fusionsforschung?

Die Sicherstellung der Energieversorgung ist eine der großen Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Gegenwärtig werden noch fast neunzig Prozent des weltweiten Energiebedarfs aus fossilen Energiequellen wie Erdöl, Erdgas und Kohle gedeckt. Diese Energiequellen sind endlich und durch die Freisetzung von Kohlendioxid drohen Klimaschäden. Verschärfend kommt hinzu, dass der weltweite Strombedarf bis 2100 auf ca. das Sechsfache ansteigen wird. Daher ist auf längere Sicht ein Umbau des Energieversorgungskonzepts notwendig.

Seit den 1950ern arbeiten Wissenschaftler und Ingenieure weltweit daran, eine andere Energiequelle nutzbar zu machen: die Kernfusion. Ziel dieser 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 aufrecht erhalten werden.

Die Entwicklung eines Fusionskraftwerks ist eine technologische und wissenschaftliche Herausforderung, die in vielen Bereichen an den Grenzen des gegenwärtig technisch Machbaren arbeitet. Industriepartner werden zu technologischen Spitzenleistungen getrieben, die es ihnen oftmals ermöglichen, durch die so erlangten neuen Kompetenzen ihre Geschäftsfelder zu erweitern. Fusionsforschungseinrichtungen und Industriepartner müssen neue Lösungen suchen und deren Umsetzung gemeinsam erproben und einüben.

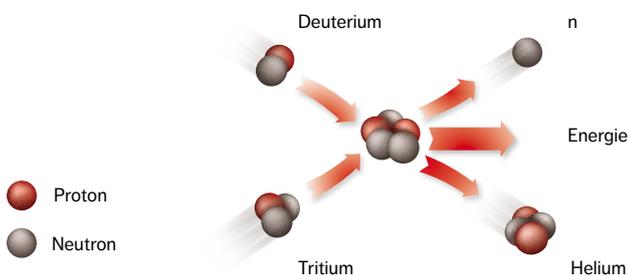
Diese Broschüre soll vor allem an Beispielen aus dem Aufbau der Fusionsanlage Wendelstein 7-X belegen, dass Industrieunternehmen nicht nur unmittelbar von Aufträgen aus der Fusionsforschung profitieren, sondern vielmehr mittelbar durch die Erweiterung ihrer Kompetenzen ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern.



Wendelstein 7-X

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) erforscht die theoretischen und physikalischen Grundlagen für ein Fusionskraftwerk. Als weltweit einziges Institut untersucht es dabei die wesentlichen Anlagentypen – Tokamak und Stellarator – parallel: In Garching wird der Tokamak ASDEX Upgrade betrieben und in Greifswald entsteht der Stellarator Wendelstein 7-X.

Reaktionsschema Kernfusion



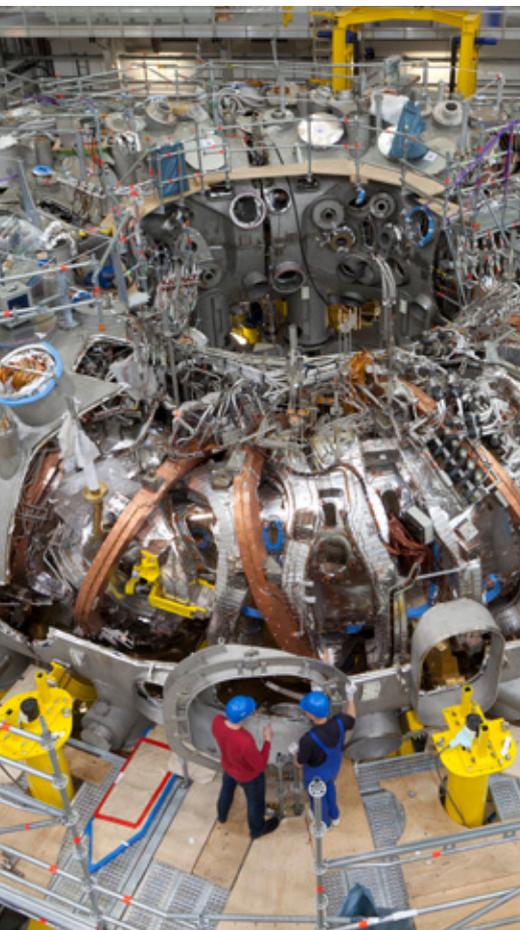
In der Sonne und den Sternen verschmelzen Wasserstoffkerne unter dem extremen Druck der Schwerkraft. Für ein Fusionskraftwerk auf der Erde müssen andere Methoden angewendet werden. Unter irdischen Bedingungen verschmelzen die beiden Wasserstoffsorten Deuterium und Tritium am leichtesten. Dabei entsteht ein Heliumkern, außerdem wird ein Neutron frei sowie große Mengen nutzbarer Energie: Ein Gramm Brennstoff könnte in einem Kraftwerk 90 000 Kilowattstunden Energie erzeugen; das entspricht der Verbrennungswärme von 11 Tonnen Kohle.

Die optimierte Anlage Wendelstein 7-X soll die Kraftwerkstauglichkeit dieses Konzepts demonstrieren. In bis zu 30 Minuten langen Entladungen wird eine wesentliche Eigenschaft gezeigt: die Fähigkeit zum Dauerbetrieb.

Kernstück des Experiments ist das Spulensystem aus 50 nichtebenen und 20 ebenen supraleitenden Magnetspulen. Diese erzeugen Magnetfelder, in denen Wasserstoffplasmen bei Temperaturen von bis zu 100 Millionen Grad eingeschlossen und untersucht werden sollen. Für die Stromleiter der Magnetspulen werden statt normalleitendem Kupfer supraleitende Stromleiter aus Niob-Titan verwendet. Während des Experimentbetriebes fließt flüssiges Helium durch die Spulen und kühlt diese auf Supraleitungstemperatur von ca. -270 Grad Celsius – das ist nahe dem absoluten Nullpunkt – ab.

Wegen der tiefen Betriebstemperatur werden die Spulen in einen Kryostaten eingebaut, der aus Plasmagefäß und Außengefäß besteht. Zwischen diesen beiden Gefäßen wird ein Vakuum erzeugt, das die Spulen von der Umgebung wärmeisoliert. Durch 254 Stützen kann das Plasma beobachtet, versorgt und geheizt werden.

Für das Aufheizen des Plasmas kommen drei verschiedene Heizungen zum Einsatz: die Mikrowellenheizung mit einer Leistung von 10 Megawatt, die Heizung mit Radiowellen mit einer Leistung von 4 Megawatt und 20 Megawatt Neutralteilcheninjektion. Firmen aus ganz Europa haben zusammen mit dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik die Komponenten für Wendelstein 7-X entwickelt und gefertigt. Außerdem beteiligen sie sich auch an der Montage der Anlage. Nicht unerhebliche Herausforderungen waren und sind in diesem Prozess zu meistern und bringen den Firmen einen Know-How-Gewinn. Auf den folgenden Seiten werden einige ausgewählte Beispiele vorgestellt.



Auf dem Maschinenfundament entsteht aus fünf Modulen der Wendelstein 7-X.

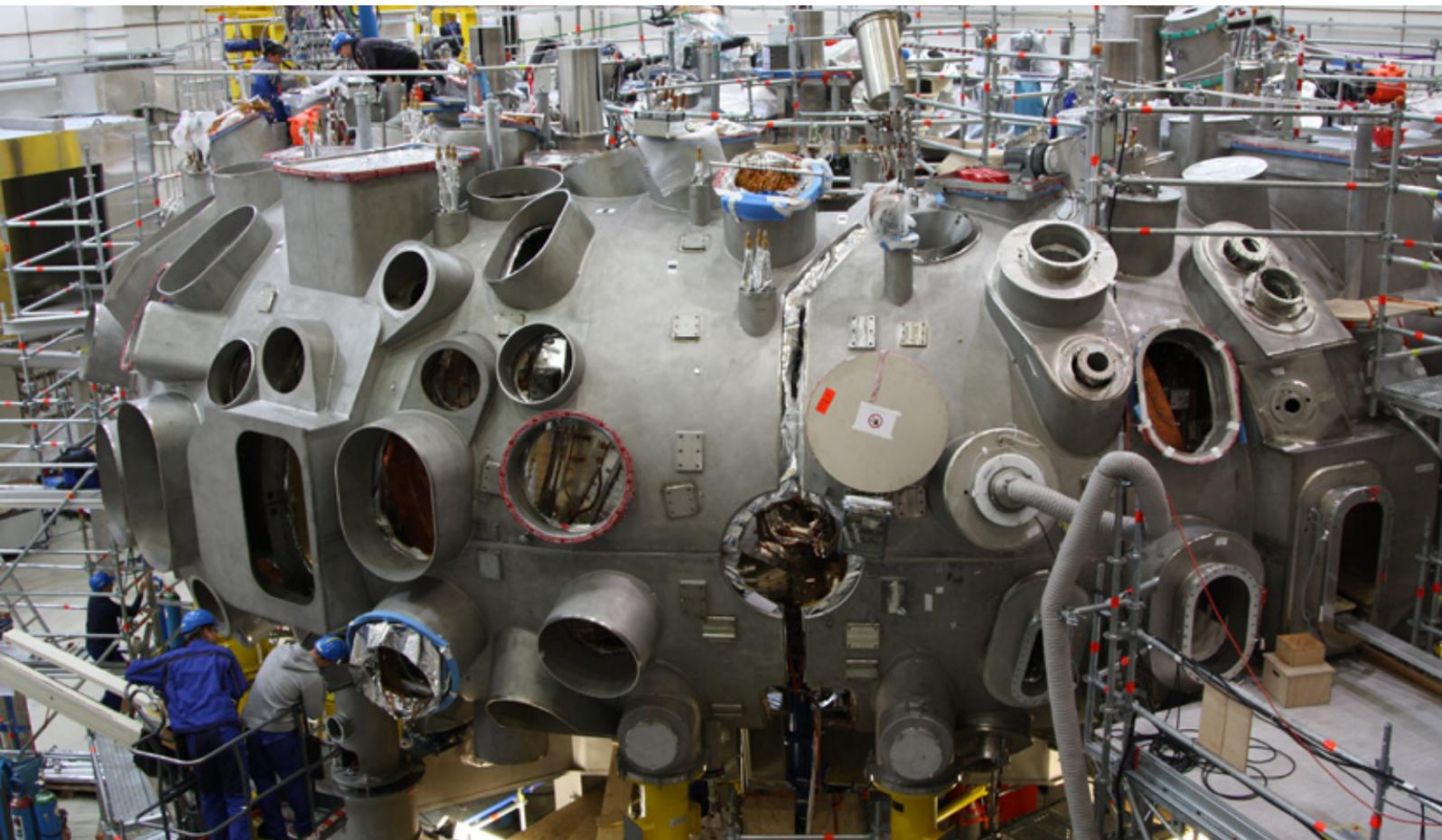


Wendelstein 7-X wird aus fünf nahezu baugleichen Modulen errichtet. Jedes Modul besteht aus einem Teil des Plasmagefäßes, seiner thermischen Isolation, zehn der supraleitenden Stellaratorspulen und vier Ebenen Spulen samt ihrer Verbindungen untereinander, der Verrohrung für die Kühlung der Spulen sowie einem Teil des stützenden Zentralrings und des Außengefäßes.

*Grafische Darstellungen des Wendelstein 7-X:
Plasmagefäß, Spulenkranz mit Zentralring, Außengefäß*

Alle fünf Module befinden sich inzwischen auf dem Maschinenfundament. Bis zur Inbetriebnahme der Anlage im Sommer 2014 sind noch viele weitere Arbeiten auszuführen: Die Module müssen miteinander verschweißt und die Stützen für die Beobachtung und Heizung des Plasmas sowie die Auskleidung des Plasmagefäßes fertig montiert werden. Parallel werden die Heizungen und die Kühlanlage für die Versorgung der Spulen mit flüssigem Helium aufgebaut und später an die Maschine angeschlossen. Außerdem wird eine Vielzahl an Messgeräten entwickelt, hergestellt und in die Maschine eingebaut.

Alle fünf Module befinden sich auf dem Maschinenfundament und müssen miteinander verbunden werden.



Große Unternehmen



MAN Diesel & Turbo SE, Standort Deggendorf, Deutschland

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

Das wie ein gewundener Stahlschlauch geformte Plasmagefäß des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X wird ein heißes Wasserstoffplasma mit einer Temperatur von ca. 100 Millionen Grad beherbergen. Die annähernd ringförmige Plasmakammer hat einen Außendurchmesser von 12,8 Metern und eine Höhe von 2,5 Metern. Da das heiße Plasma unmittelbar der Geometrie des Magnetfeldes folgt, muss auch das Stahlgefäß exakt der Form des Magnetfeldes entsprechen. Die daraus erwachsenden Ansprüche an den Stahlgefäßbau bei MAN Diesel & Turbo waren für das Unternehmen neu und eine beachtliche Herausforderung: Ein 30 Kubikmeter-Gefäß aus 17 Millimeter dickem Edelstahl mit einer ungewöhnlich komplexen 3D-Form musste mit einer generellen Maßhaltigkeit von nur +/- 2 Millimetern gefertigt werden. Die Plasmakammer besteht aus insgesamt 200 Ringen. Diese wurden aus Stahlblechstreifen mit einer Breite von 15 Zentimetern zusammengesetzt, die vielfach geknickt die geforderten geschwungenen Konturen nachformten. Ultrahochvakuumdicht verschweißt wurden 20 Sektoren fertiggestellt und ausgeliefert, die dann – vor Ort verschweißt – schließlich den geschlossenen Ring ergeben. In der Plasmagefäßwand befinden sich etwa 300 verschieden große Öffnungen. Sie ermöglichen den Zugang für die technische Versorgung und wissenschaftliche Untersuchung des Plasmas. Der Auftrag wurde von MAN Diesel & Turbo in Deggendorf zuverlässig abgewickelt.



Schweißarbeiten am Plasmagefäß von Wendelstein 7-X

Für diese Arbeiten mussten am Standort Deggendorf eine ganze Reihe neuer Verfahren eingeführt und entwickelt werden:

- Der Fertigung eines so komplexen Gefäßes ging eine detaillierte Modellierung im Computer voraus. Der Auftrag wurde von MAN Diesel & Turbo zum Anlass genommen, das modernste derzeit verfügbare Design-Programm für dreidimensionale räumliche Konstruktion einzuführen. Seither gehört räumliche Konstruktion zum Know-how des Unternehmens.
- Die Maßhaltigkeit des Gefäßes musste höchsten Ansprüchen genügen. Um die Form des Gefäßes überprüfen und nachweisen zu können, hat MAN Diesel & Turbo in Deggendorf erstmals ein elektronisches, lasergestütztes Vermessungssystem verwendet. Dieses befindet sich inzwischen bei Serienprodukten im Routineeinsatz.
- Eine besondere Herausforderung war für MAN Diesel & Turbo die eigentliche Fertigung des Stahlkörpers. 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.

*(Der Spiegel 1/2009)

- Für den Einbau von Wandelementen im Plasmagefäß sind Stahlkonsolen erforderlich, die äußerst genau positioniert werden müssen. Die präzise Positionierung in einer räumlich hochkomplexen Umgebung erforderte die Anschaffung eines 6-Achsen-Handhabungs-Roboters, den MAN Diesel & Turbo seither im Routineeinsatz nutzt. Zusätzlich hat sich das Unternehmen das dreidimensionale Wasserstrahlschneiden zum präzisen Herausarbeiten der über 300 Öffnungen zugänglich gemacht.

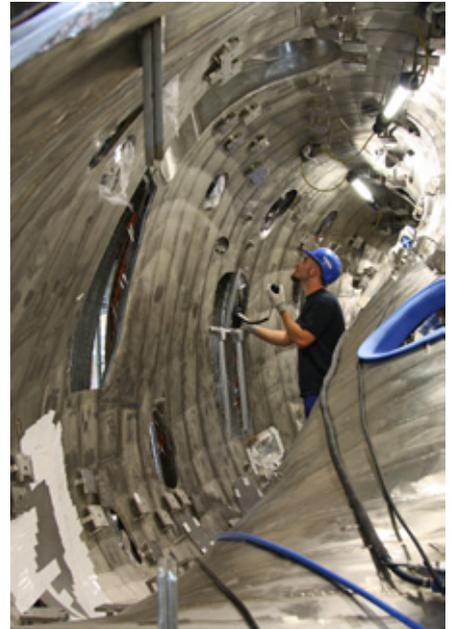
Von all diesen Weiterentwicklungen im Stahlbau hat MAN Diesel & Turbo direkt oder indirekt als Unternehmen profitiert. Neue Techniken wurden eingeführt und gemeinsam mit dem Auftraggeber, dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, verfeinert. Diese Technologien sind in die Serienproduktion chemischer Reaktoren bei MAN Diesel & Turbo eingeflossen. Bereits hochqualifizierte Ingenieure und Techniker konnten ihre Kompetenz erweitern und damit ihre Wettbewerbsfähigkeit erhöhen.

Die 70 Magnete des Wendelstein 7-X werden mit flüssigem Helium auf -270 Grad Celsius abgekühlt. Auf diese Art und Weise versetzt man sie in einen supraleitenden Zustand und die Magnetspulen verbrauchen nach dem Einschalten kaum Energie. Das Plasmagefäß, das Außengefäß und alle 254 Stutzen-Rohre, die den Zugang in das Plasmagefäß ermöglichen, sind mit einer sogenannten „thermischen Isolation“ versehen. Es handelt sich dabei um eine geknitterte, mehrlagige, aluminiumbeschichtete Kunststoffolie, die mit einer aktiv gekühlten Hülle bedeckt wird. Dies war eine herausfordernde, vorher noch nie bewältigte technische Aufgabe, die Ingenieure von MAN Diesel & Turbo in Deggendorf gemeinsam mit Ingenieuren und Physikern vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik erfolgreich gelöst haben. In enger Kooperation konnten immer wieder Lösungswege für die vielen technischen Probleme gefunden werden, die am Ende zu einem optimalen Ergebnis geführt haben.

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

Dabei ragen einige Einzelelemente heraus:

- Zur thermischen Isolation des Plasmagefäßes mussten aktiv gekühlte Abdeckelemente, die sogenannten Schilde, gefertigt werden. Wegen der unkonventionellen Form des Plasmagefäßes und der extrem engen Platzverhältnisse mussten an die Formgenauigkeit der Schilde allerhöchste Ansprüche gestellt werden. Versuche mit Stahl, Messing und Kupfer waren erfolglos, trotz weit fortgeschrittener Formtechnik. Die Lösung bestand dann in Schilden aus glasfaserverstärktem Kunststoff.
- Diese Kunststoffschilde mussten nicht nur genau in exotische Formen gebracht werden, sie sollten zudem Wärme leiten können. Mit einem gemeinsam patentierten Verfahren wurde eine Lösung gefunden, die auf einlamierten Kupfergittern beruht. Damit konnte ein gut wärmeleitender Verbundwerkstoff für Anwendungen bei tiefsten Temperaturen entwickelt werden.
- Die Montage der thermischen Isolation durch MAN Diesel & Turbo Deggendorf war für das Unternehmen ein Wagnis. Es handelte sich nämlich 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 muss.



Innen- und Außenansicht des Plasmagefäßes von Wendelstein 7-X



Montage der thermischen Isolation des Außengefäßes (Messingschilde)

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

MAN Diesel & Turbo SE
(Standort Deggendorf, Deutschland)

Aufträge:

Plasmagefäß, Kryostat, thermische Isolation, Wandpaneele, Montage

MAN Diesel & Turbo Deggendorf hat sich durch den Auftrag zur Herstellung der Thermischen Isolation ein neues Betätigungsfeld in einem Hochtechnologiebereich erschlossen. Mit Unterstützung durch einen Fachberater von der Firma Linde hat sich MAN in dieses Gebiet eingearbeitet. Kryotechnik wird neben der Fusionstechnik auch im Bereich der Hochenergiebeschleuniger z. B. bei den im Bau befindlichen Projekten TESLA in Hamburg oder FAIR in Darmstadt eingesetzt.

Thales Electron Devices, Paris-Velizy, Frankreich
Element Six, Großbritannien
Diamond Materials GmbH, Reuter Technologie GmbH, Deutschland

*Die Plasmaheizung des Wendelstein 7-X
 „Diamanten als Fenster zum Plasma“*

Das Plasma muss für das Anfachen der Fusionsreaktion auf Temperaturen von 100 Millionen Grad Celsius aufgeheizt werden. Dafür braucht man geeignete Heizungen. Eine sehr attraktive Möglichkeit ist das Aufheizen des Plasmas mit Mikrowellen. Hierfür müssen sehr starke Mikrowellenröhren mit einer Leistung von mindestens 1 Million Watt entwickelt und gebaut werden. Dies ist bereits vor einigen Jahren in Russland, den USA und Japan gelungen, allerdings jeweils nur mit einer Heizdauer von wenigen Sekunden. Für Wendelstein 7-X mussten jedoch Mikrowellenröhren, so genannte Gyrotrons, entwickelt werden, die 30 Minuten ihre volle Leistung liefern. Das ist mehr als die hundertfache Dauer und bedeutete, dass man in vollkommen neue Entwicklungsdimensionen vorstoßen musste. Dieser Prozess wurde in enger Verzahnung zwischen der Firma Thales Electron Devices (TED), dem Karlsruher Institut für Technologie und dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik vorangetrieben.

- Die gemeinsame Entwicklung des Prototypen lief überaus erfolgreich, sodass man sofort die Serienfertigung starten konnte. Probleme, die im Verlauf der Serienfertigung dieser einzigartigen Hochleistungsmikrowellenröhre auftraten, stellten das Konsortium vor neue technische Herausforderungen. Während der Serienfertigung war es zu einem Wechsel des verwendeten Keramikmaterials gekommen, was zu unerwünschten elektromagnetischen Schwingungen im Strahlentunnel führte. Das Karlsruher Institut für Technologie hat als Lösung eine speziell berechnete Symmetriestörung für den Strahlentunnel vorgeschlagen und patentiert, die sich hervorragend bewährt hat. Inzwischen wird diese Lösung ebenfalls für andere Röhren vorgeschlagen, die bei der Fa. CPI in den USA gebaut werden.
- Ein weiteres Problem ist die hohe Wärmeleistung, die durch den Elektronenstrahl der Röhre auf dem Kollektormaterial deponiert wird. Durch zeitweise auftretende hohe lokale Belastungen kommt es zu einer Verschlechterung des Vakuums. Die beteiligten Forschungsinstitute schlugen vor, durch zeitlich veränderliche, von außen angelegte Magnetfelder die Wärmeleistung breiter zu verteilen. Dies wurde von der Firma TED umgesetzt und stellt einen Durchbruch bei der Zuverlässigkeit der Mikrowellenröhre im Dauerbetrieb dar. Für dieses Verfahren wurde ein gemeinsames Patent erteilt. Es ist allgemein auf Hochleistungselektronenröhren übertragbar und hat damit erhebliches Potential, Hochleistungsröhren in allen Anwendungsgebieten beträchtlich zu verbessern.
- Ein kritisches Bauteil eines Gyrotrons ist ebenfalls das Fenster zwischen der Röhre und der Außenwelt. Um die Wärmeverluste im Fenster relativ niedrig zu halten, werden diese aus künstlichen Diamanten mit hoher Reinheit hergestellt. Die Diamantscheiben, die in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie von den Firmen Diamond Materials (Freiburg) und Element Six (England) in einem weiterentwickelten Verfahren durch Gasphasenabscheidung (CVD) gefertigt wurden, sind mit einem Durchmesser von bis zu 120 Millimetern und einer Dicke von 1,8 Millimetern in dieser Größe weltweit einmalig und hervorragend für Anwendungen in der Millimeterwellenheizung geeignet.

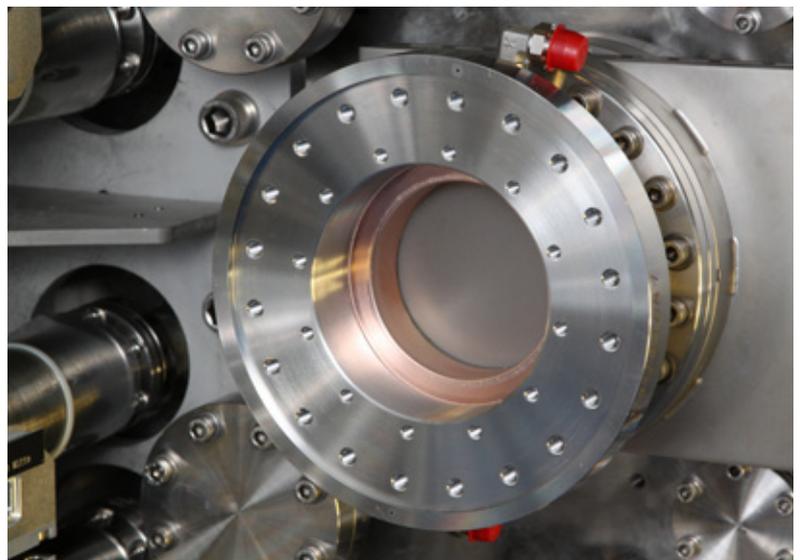
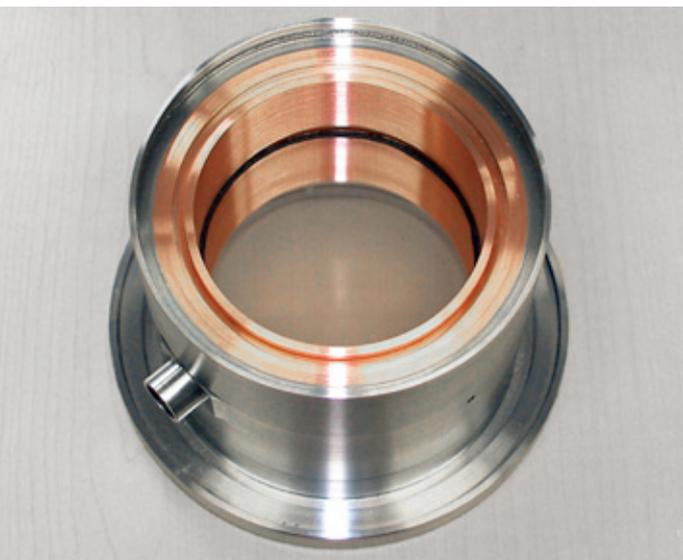


Thales SA: Hochleistungsmikrowellenröhre für den Dauerbetrieb



Thales SA: Neuer Strahlkanal für die Mikrowellenröhre

- Die Diamantfenster benötigen eine zuverlässige Kühlung. Die Kühlung mit Wasser birgt die Gefahr von Korrosion, daher wurde in dieser Entwicklung erstmals erfolgreich Silikonöl 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. 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.



Reuter Technologie: Verlötete CVD Diamantscheibe in einem Torus-Diamantfenster

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. Die Firma TED 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 Know-how für zukünftige Aufträge ebenfalls deutlich besser aufgestellt.

Fakten:

Forschungseinrichtungen:

Karlsruher Institut für Technologie, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Universität Stuttgart

Industriepartner:

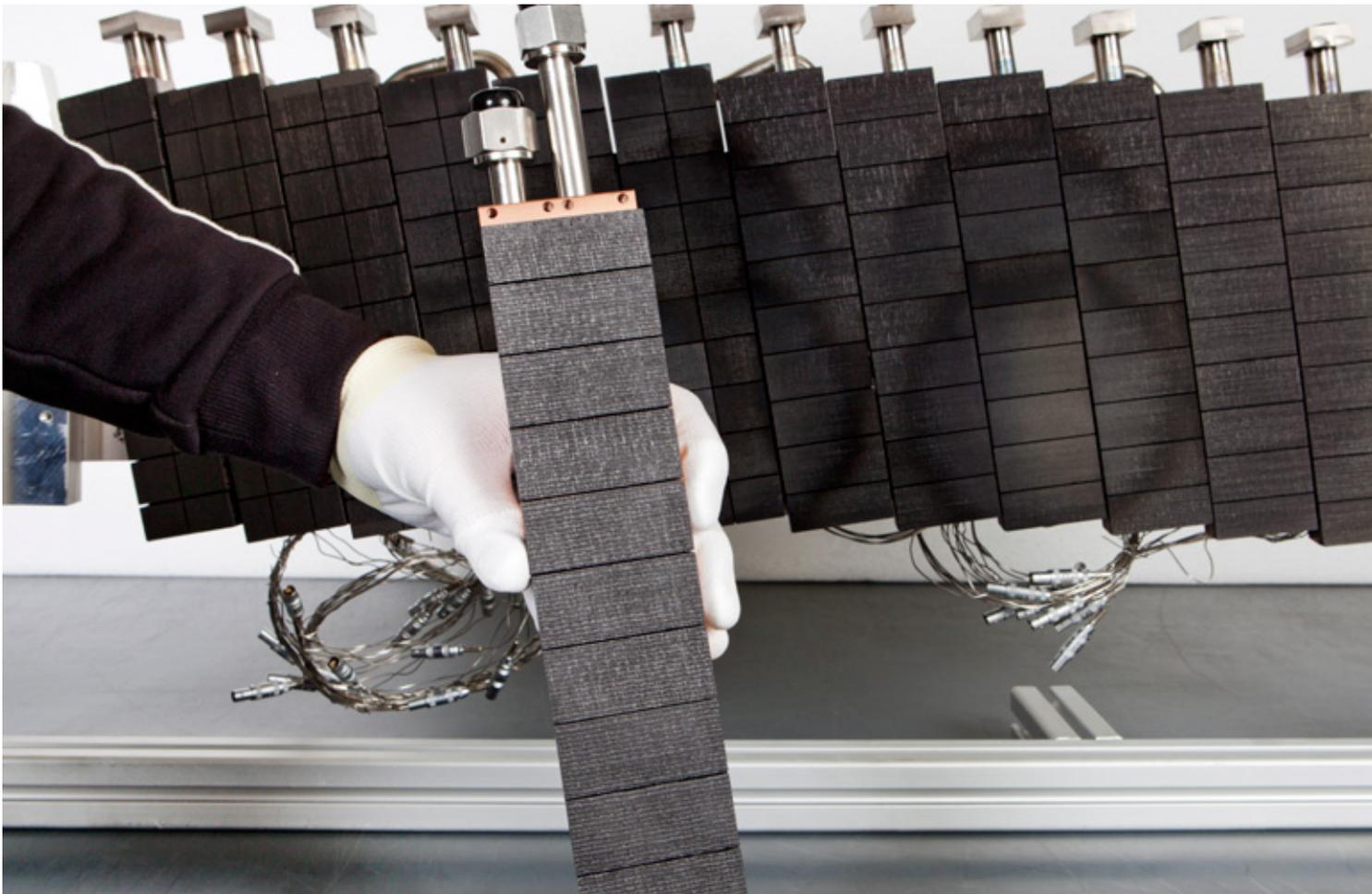
Thales Electron Devices, Abteilung Mikrowellenröhren (Paris-Velizy, Frankreich), Diamond Materials (Freiburg, Deutschland), Element Six (Ascot, London, Großbritannien), Reuter Technologie (Alzenau/Schöllkrippen, Deutschland)

Aufträge: 8 Hochleistungsgyrotrons à 1 MW Ausgangsleistung für 30 min

Die hochbelastete Wand des Wendelstein 7-X „10000 Herdplatten auf einem Quadratmeter“

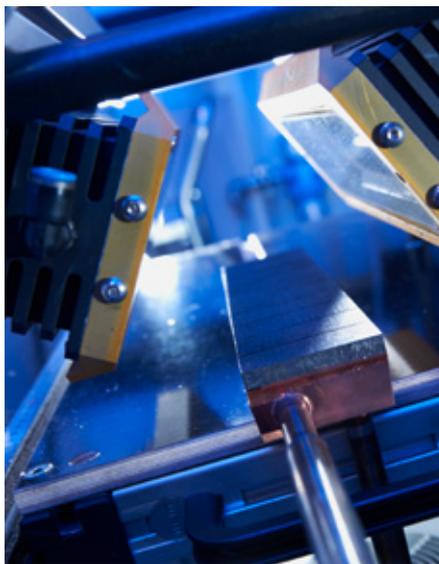
Plansee SE, Reutte, Österreich

Für das Aufheizen des Fusionsplasmas auf die notwendigen hohen Temperaturen von ca. 100 Millionen Grad Celsius werden sehr hohe Heizleistungen benötigt, die ohne weiteres einige 10 Millionen Watt betragen. Obwohl das heiße Plasma im Inneren des Gefäßes von den magnetischen Kräften in Schwebe gehalten wird, gerät das Plasma an seinem Außenrand dennoch in Kontakt mit den umgebenden Wänden. Das Plasma kühlt sich jedoch vom Zentrum bis zur Wand dramatisch ab, nämlich auf „nur“ noch etwa



Hochbelastbare, wassergekühlte Wandelemente

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. Am Wendelstein 7-X soll die Tauglichkeit von Stellaratoren für den Dauerbetrieb getestet



Targetelemente bei der Thermografieprüfung

werden. Daher wurde die Entwicklung eines entsprechend leistungsfähigen Divertors notwendig. Die Firma Plansee SE entwickelte dafür sogenannte Targetelemente. Diese müssen pro Quadratmeter 10 Millionen Watt dauerhaft abführen können und erfordern daher eine geschickte Kombination aus kohlefaserverstärktem Kohlenstoff und einem wassergekühlten Metallblock, der sogenannten Wärmesenke. Dabei wurden wichtige Entwicklungsschritte in enger Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik vorangetrieben:

- Besonders schwierig ist das Fügen des kohlenstofffaserverstärkten Kohlenstoffs auf die wassergekühlte Wärmesenke aus einer Metalllegierung. Der Kohlenstoff ist im Kontakt mit dem Plasma und sehr hohen Wärmeflüssen ausgesetzt. Die Wärmesenke wird bei hohem Druck von Wasser durchströmt. Für die Verbindung beider Elemente musste der Kohlenstoff zunächst mit einer strukturierten Kupferschicht versehen werden, die erst dann auf die Metallsenke geschweißt werden konnte. Nur so konnte eine gute Wärmeleitung von der Oberfläche der Kohlenstoffschicht zur Wärmesenke sicher gestellt werden. Gleichzeitig galt es, die unterschiedliche Wärmeausdehnung der Materialien zu kompensieren. Dieses Verfahren wurde von der Firma 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 viel mehr Wärme transportieren kann.
- Die Qualitätssicherung für dieses komplexe, aus mehreren Materialien zusammengesetzte Bauteil stellt vor allem bei der Serienfertigung (insgesamt 890 Stück, 18.000 Kacheln) eine große Herausforderung dar. Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik als Auftraggeber hat gemeinsam 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 Thermografieprüfungen.

Die oben genannten 10 Millionen Watt pro Quadratmeter sind höher als die Belastung der 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 kohlefaserverstärkte Kohlenstoffkacheln verwendet. Hier treffen sich Raumfahrttechnologien 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 (<http://www.extremat.org>). Die Firma Plansee war hier unter den über 30 vornehmlich industriellen Partnern führend beteiligt.

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

Plansee SE (Reutte, Österreich)

Aufträge:

Entwicklung und Bau von Elementen der ersten Wand, insbesondere im Divertorbereich

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

Duktiles Wolfram „Ideenreich zum Strukturwerkstoff für hohe Temperaturen“

Plansee SE, Reutte, Österreich

Fusionskomponenten müssen eine hohe Betriebsstabilität unter extremen Bedingungen gewährleisten. Insbesondere der Divertor, der der Abfuhr der „Helium-Asche“ des „brennenden“ Plasmas dient, ist dabei extremen Wärmeflüssen von 10 MW/m² und mehr ausgesetzt.

Selbst die hinter einem Hitzeschild angeordneten Strukturkomponenten (z.B. Kühlkanäle) können dabei Betriebstemperaturen von über 700 °C erreichen und müssen dennoch über eine gute Temperatur- und Druckfestigkeit bei gleichzeitiger plastischer Verformbarkeit verfügen – eigentlich völlig gegenläufige Anforderungen.

Gängige Rohre aus Hochtemperaturwerkstoffen wie z. B. Wolfram eignen sich wegen ihres spröden Materialverhaltens unter fusionsrelevanten Bedingungen nicht als Strukturwerkstoff.

In Zusammenarbeit mit der Firma Plansee wurde daher ein völlig neues Hochtemperaturmaterial auf Basis von Wolframfolie entwickelt. Das Laminat aus Wolframfolien und Zwischenschichten aus „weicherem“ Material besteht aus mehreren stoffschlüssig verbundenen Ebenen und lässt sich auf Grund seiner plastischen Verformbarkeit leicht zu einem Rohr verarbeiten. Selbst bei hohen Drücken von bis zu 1000 bar und Raumtemperatur bleibt die Testkomponente rissfrei und intakt.

Die Entwicklung dieses verformbaren „Wolframs“ ist nicht nur für die Fusionsforschung ein viel versprechender Ansatz, sondern auch für viele andere Anwendungsgebiete.

Die Firma Plansee hat das duktile Wolframlaminat gemeinsam mit dem KIT bereits zum Patent angemeldet und verspricht sich als Anbieter von Hochtechnologie-Werkstoffen, zukünftig Werkstoffprobleme im Hochtemperaturbereich einfacher lösen zu können.

Fakten:

Forschungseinrichtung:

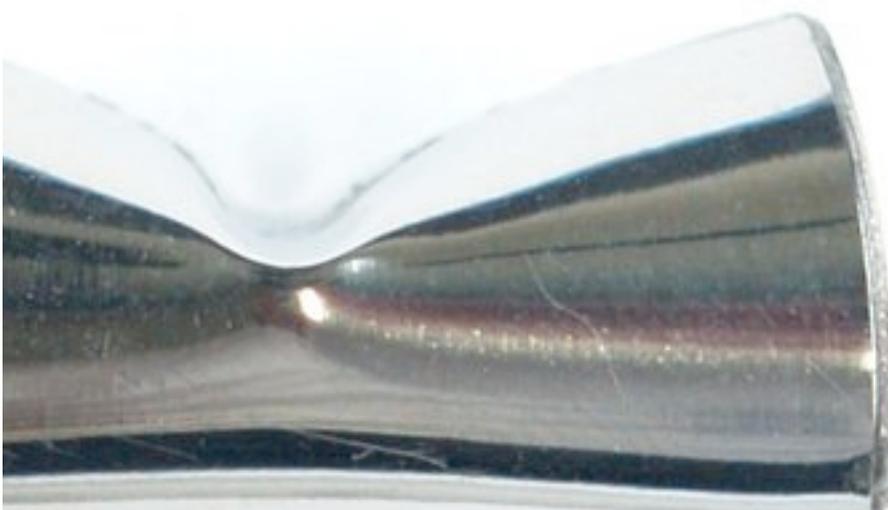
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

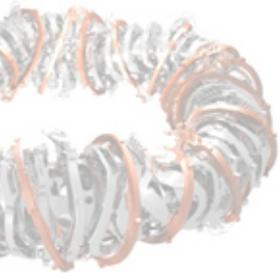
Plansee SE (Reutte, Österreich)

Aufträge:

Entwicklung und Bau von Elementen der ersten Wand, insbesondere im Divertorbereich



Sprödbrech von Wolfram Massivmaterial und duktilen Verhalten des Wolframlaminats nach Kerbschlagbiegeversuch



Babcock Noell GmbH, Würzburg, Deutschland

Das Plasma muss auf einer Temperatur von 100 Millionen Grad gehalten werden. Ringförmige magnetische Felder, die in sich verdrillt sind, schließen das Plasma wärmeisoliert ein und halten es von den kalten Gefäßwänden fern. Es ist nun die große Kunst, das „richtige“ magnetische Feld zu finden. Bei einer Fusionsanlage vom Typ Stellarator, zu dem der Wendelstein 7-X gehört, wird das magnetische Feld allein durch die Form

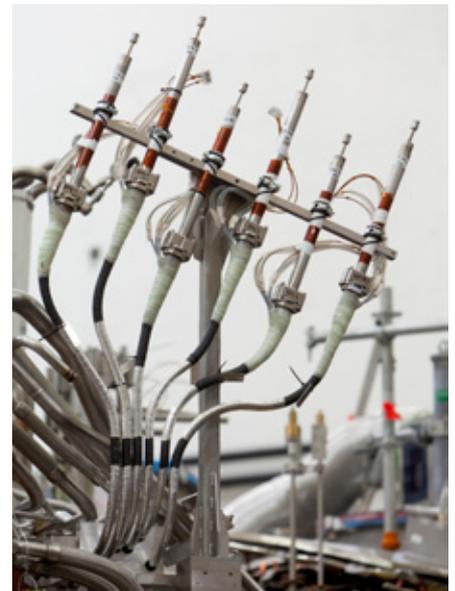
Vorbereitung einer nichtebenen Spule für die Montage



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

der äußeren Magnetspulen bestimmt. Ein Jahrzehnt systematischer Berechnungen mit der Hilfe von Supercomputern der späten 80er und 90er Jahre hat die komplex wirkende Form der Spulen des Wendelstein 7-X ergeben. Da sie streng nach physikalischen Optimierungsprinzipien bestimmt wurden, können sie als „ideale“ Form angesehen werden. Die technische Realisierung dieser Spulenform war für das beauftragte Unternehmen eine große Herausforderung. Es wurden dazu ein Konsortium und ein Europäisches Netzwerk mit mehreren Unterauftragnehmern gegründet, die die Fertigung der verschiedenen Komponenten der Spulen übernommen haben. Auch dabei musste eine Vielzahl von technischen Problemen gelöst werden:

- Für die Fertigung der supraleitenden, räumlich komplex geformten Wickelpakete der Spulen mussten die Konsortialpartner Babcock Noell GmbH und Ansaldo Superconductors S.p.A. Methoden entwickeln, den Supraleiter in die erforderliche Form zu bringen. Dazu wurden entsprechende Wickelformen gebaut und erfolgreich eingesetzt. Außerdem sammelte Babcock Noell neue 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.
- Da bei einer Schnellabschaltung sehr hohe Spannungen anliegen, müssen die Spulen robust sein und diesen Spannungen widerstehen. Daher wurde jede einzelne Spule verschiedenen Hochspannungstests mit Spannungen bis zu 13000 Volt unterzogen. Ein besonders empfindlicher Hochspannungstest findet in einer dünnen Gasatmosphäre statt. Schwächen bei der elektrischen Isolation der Spulen zeigten sich dann in einer Leuchterscheinung und konnten zielgenau repariert werden. Dieser so genannte Paschen-Test wurde als Bestandteil der Werksprüfung der Spulen gemeinsam mit der Babcock Noell GmbH entwickelt. Dieser – sehr strenge – Test hat neue Standards bei der Qualitätssicherung supraleitender Magnete gesetzt.



Fertigung der nichtebenen Spulen von Wendelstein 7-X

Das Team von Babcock Noell GmbH hat bei der Abwicklung des Wendelstein 7-X-Auftrags umfangreiche Kompetenz entwickelt, die im Anschluss schon bei weiteren Projekten erfolgreich eingesetzt wurde und auch die Grundlage des Angebots für die ITER-Poloidal-feld-Spulen darstellte. W7-X diente dabei als wichtigste Referenz. Anfang 2012 erhielt die Babcock Noell GmbH von der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) einen Auftrag über die Fertigung und Lieferung von 113 supraleitenden Magneten für die Forschungsanlage FAIR in Darmstadt. Ansaldo Superconductors hat die bei den W7-X-Spulen gewonnenen Erfahrungen erfolgreich in ein Konsortium eingebracht, welches sich für die ITER-Toroidal-feld-Spulen beworben hat und nun die EU-Wickelpakete herstellen wird.

Fakten:

Forschungseinrichtungen:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, CEA
- Commissariat d'Énergie Atomique (Saclay, Frankreich)

Industriepartner:

Babcock Noell GmbH (Würzburg, Deutschland),
Ansaldo Superconductors S.p.A. (Genua, Italien)

Auftrag:

50 supraleitende nichtplanare Spulen

Babcock Noell GmbH, Würzburg, Deutschland

Die supraleitenden Magnete, die in einem Fusionsreaktor das zum Plasmaeinschluss notwendige Magnetfeld erzeugen, werden mit flüssigem Helium auf sehr tiefe Temperaturen abgekühlt. Das Helium wird über Metallrohre zu den unter Hochspannung stehenden Magneten geleitet.

Axialer Hochspannungstrenner „Kraftvolle Entladungen sicher gepuffert“

Da die Magnete bei einer Schnellabschaltung hohe Spannungen von bis zu mehreren 10.000 Volt erzeugen können, müssen zwischen die Metallrohr-Zuleitungen und die Verrohrung Hochspannungs-Trenner installiert werden.

Die Aufgabe dieses Hochspannungs-Trenners ist es, die Helium-Leitungen im Inneren der Magnete elektrisch von den Zuleitungen zu isolieren, die Kräfte, die bei einer möglichen Entladung im Magnet-Inneren entstehen, durch- und überschlagesicher abzufangen und die für die Erhaltung des Magnetfeldes notwendige Heliumkühlung aufrecht zu erhalten.



Qualifizierter 56 kV Trenner nach erfolgreichen Hochspannungs- und Materialtests



Industriell herstellbare Trenner für verschiedene Temperaturen werden von Babcock Noell realisiert. Die Tauglichkeit dieser Trenner wurde im KIT durch anspruchsvolle Hochspannungs- und Materialtests nachgewiesen. Selbst Belastungen bei $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, 70 kV und 60.0000 Zyklen haben die Prototypen unbeschädigt und gasdicht überstanden und sind somit für den Einsatz z. B. in ITER qualifiziert.

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Karlsruher Institut für Technologie

Industriepartner:

Babcock Noell GmbH (BNG)
(Würzburg, Deutschland)

Aufträge:

Entwicklung eines Hochspannungstrenners für ITER

Babcock Noell kann nunmehr Trenner anbieten, die im Hinblick auf Vakuumdichtheit, mechanische Robustheit und Hochspannungsfestigkeit neue Maßstäbe setzen. Dies fördert auch den Absatz dieser Trenner außerhalb des Bereichs Fusion, z. B. bei GSI/FAIR.

Kälteanlage für Wendelstein 7-X „Nahe dem absoluten Nullpunkt“

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

Die Magnete des Wendelstein 7-X müssen auf die Temperatur von -270 Grad Celsius abgekühlt werden. Bei dieser Temperatur, die weniger als 4 Grad über dem absoluten Nullpunkt liegt, setzt die Supraleitung ein. Dazu wird flüssiges Helium durch einen Hohlraum im Leiter der Spulen gepumpt. Das Heliumgas wird dafür in einer großen Kühlanlage verflüssigt und auf die erforderliche niedrige Temperatur gebracht. Da es sich um einen geschlossenen Kühlkreislauf handelt, muss die Anlage auf die verschiedenen Betriebszustände der Magnete äußerst flexibel reagieren können. Die Firma Linde AG entwickelte die industriell verfügbare Technologie erheblich weiter. Die geforderte Flexibilität der Kryoanlage wurde durch eine geschickte Kombination aus Turbinen, kalten Kompressoren und hauptsächlich kalten Zirkulatoren erreicht. Ein Speichertank für das flüssige Helium ermöglicht rasche Leistungssteigerungen. Insgesamt handelt es sich bei der Helium-Kälteanlage des Wendelstein 7-X um eine der modernsten und flexibelsten weltweit.

Durch den Bau der durch ihre Flexibilität sehr speziellen Kälteanlage von Wendelstein 7-X konnte Linde Kryotechnik seine Expertise in Konzeption und im Bau von komplexen Großkälteanlagen im Tieftemperatursegment ausbauen und sich für neue Großprojekte weiter qualifizieren.

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

Linde AG, (München, Deutschland);

Linde Kryotechnik (Pfungen, Schweiz)

Aufträge:

Helium-Verflüssigungsanlage



Blick in die Kälteanlage von Wendelstein 7-X





EADS-RST, Rostock, Deutschland

Für die Montage der Spulen, Stutzen und Gefäßeinbauten werden Vorrichtungen eingesetzt, die eine freie Ausrichtung in allen sechs Freiheitsgraden ermöglichen. Außerdem können die Montagevorrichtungen aufgrund der engen Bauräume nur stark eingeschränkt bedient werden und es müssen extreme Genauigkeitsanforderungen berücksichtigt werden. EADS-RST fertigte zwei Manipulatoren zur präzisen Positionierung und Ausrichtung der bis zu 3,5 Meter großen und bis zu 6 Tonnen schweren Spulen, ein drehbares und exakt positionierbares Montageportal, das die Maschine überspannt, sowie einen Manipulator, der im beengten Maschineninneren computergesteuert das hochgenaue Positionieren von Einbauteilen übernimmt.

Entwicklung von speziellen Vorrichtungen für die Montage „Sechs Tonnen mit der Präzision eines Uhrmachers positionieren“

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

EADS-RST (Rostock, Deutschland)

Aufträge:

Konstruktion, Fertigung und Inbetriebnahme von Sondervorrichtungen für die Montage des W7-X

EADS-RST entwickelte für das IPP eine komplexe Handhabungstechnik, 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-Know-how, das sie zukünftig in stärkerem Maße zu einem Anbieter von komplexer Handhabungstechnik werden lässt. EADS-RST hat genaue Kenntnisse über die Positionsregelung und -steuerung von verschiedenen Präzisionsvorrichtungen erlangt, die im Bereich von wenigen Kilogramm bis zu mehreren Tonnen unter eingeschränkter Zugänglichkeit und Beobachtbarkeit mit Genauigkeiten bis in den Submillimeterbereich wirtschaftlich anwendbar sind. Diese Kenntnisse erweitern das Angebotspotenzial der Firma für die Entwicklung von Vorrichtungen für den Sondermaschinenbau. Die Firma erhielt zwischenzeitlich Anfragen von einem anderen deutschen Forschungsinstitut für die Entwicklung einer Spezialvorrichtung und plant, seine Kooperationen zukünftig zu erweitern.



Roboter werden für das Positionieren von ca. 6000 Bolzen und Halterungen an den Innenwänden des Plasmagefäßes eingesetzt.

Kleine und mittlere Unternehmen

Kraftanlagen Heidelberg GmbH, Deutschland

HELOKA-LP – Testeinrichtung für Komponenten aus der Fusionsforschung „Besondere Fusionsmaterialien erfordern besondere Testanlagen“

Die „Helium Loop Karlsruhe – Low Pressure“ (HELOKA-LP)-Anlage ist ein wichtiger Baustein der Entwicklungsphase für die „International Fusion Materials Irradiation Facility“ (IFMIF). IFMIF dient zur Erforschung und Lizenzierung neuartiger Materialien, die ihren Einsatz in plasmanahen Komponenten im ersten Kernfusionskraftwerk finden werden. Diese Materialien müssen gegen sehr hohe Temperaturen und hochenergetische Neutronenbestrahlung resistent sein, die während des Fusionsprozesses entstehen. In IFMIF werden die für die Fusion typischen schnellen Neutronen mit Hilfe eines Teilchenbeschleunigers künstlich erzeugt. In optimierten Bestrahlungsmodulen sollen vor allem innovative Stahlsorten getestet werden. Für die Messung des Energieflusses sollen Anlagen zum Einsatz kommen, die mit HELOKA-LP entwickelt werden.

Für die Konzeption und den Aufbau der HELOKA-LP Anlage hat Kraftanlagen Heidelberg als Generalunternehmer eine Reihe von Aufgaben gelöst:

- Bei den Versuchen an der HELOKA-LP Anlage wird die in IFMIF vorherrschende Neutronen-Heizung elektrisch ersetzt. Diese war zu konzipieren und aufzubauen.
- Die erforderliche Strömung liefert hierbei die HELOKA-LP Anlage. Sie umfasst einen Heliumkreislauf und eine Druckluftstrecke, wobei die erforderlichen Strömungen sowohl von einem Heliumkompressor (Leistung: 350 Kilowatt), als auch alternativ von einem Druckluftkompressor (Leistung: 500 Kilowatt) erzeugt werden. Helium als einatomiges, leichtes und bewegliches Gas ist bei den benötigten Drücken und Temperaturen sehr anspruchsvoll.
- Zudem ist der Anlage ein Heliumversorgungssystem inklusive Vakuumeinheit beigegeben, um sowohl die Verfügbarkeit als auch die Reinheit des Heliums zu garantieren. Die Reinheit ist wichtig, um Korrosionsproblemen entgegenzuwirken.
- Mittels eines komplexen Regelungssystems kann am Eintritt des prototypischen Bestrahlungsmoduls ein breites Spektrum von Betriebsbedingungen in Bezug auf Betriebsdrücke, Massendurchfluss und Betriebstemperaturen eingestellt werden, die zur Quantifizierung des Testmoduls hinsichtlich Kühleffizienz notwendig sind. Gesteuert wird die Anlage dabei über ein Prozessleitsystem (Siemens PCS7), mit dessen Hilfe die Anlage vollautomatisch betrieben werden kann. Während des Betriebes werden alle Versuchsparameter mittels einer schnellen Datenerfassung (100 Millisekunden) erfasst, dokumentiert und dienen dem Betreiber der Anlage zur Analyse seiner Versuchsreihen.



Die Testanlage HELOKA am Karlsruher Institut für Technologie

Helium-Anlagen mit vergleichbaren Parametern wurden bisher noch nicht gebaut. Dank der guten Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie konnte Kraftanlagen Heidelberg daher neues Know-how erwerben und ist für die Beteiligung am zukünftigen IFMIF-Kühlsystem und weiteren Subsystemen (zum Beispiel im Fernhantierungsbereich der Anlage) bestens aufgestellt.

Fakten

Forschungseinrichtung:

Karlsruher Institut für Technologie

Industriepartner:

Kraftanlagen Heidelberg GmbH
(Heidelberg, Deutschland)

Aufträge:

Komplettdesign und Aufbau des Helium-Kreislauf Karlsruhe (HELOKA-LP)

Thomson Broadcast, Turgi, Schweiz

Entwicklung einer Hochspannungs-Gleichstrom-Versorgungsanlage „Hochspannend und ausdauernd“

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

Thomson Broadcast (Turgi, Schweiz)

Auftrag:

Hochspannungs-Gleichstrom-Versorgungsanlage

Für die verschiedenen Heizsysteme von Wendelstein 7-X wurde eine 130 Kilovolt Hochspannungs-Gleichstrom-Versorgungsanlage mit einer Gesamtleistung von 24 Megawatt Dauerstrichbetrieb entwickelt. Diese Anlage muss die hohen Ansprüche vor allem der Mikrowellenröhren (siehe oben) erfüllen. Dazu musste die von der Firma Thomson erhaltliche Anlage erheblich verbessert werden: Der Spannungsbereich wurde erhöht und vor allem wurden die Regelgenauigkeit verbessert und die Güte des Gleichstroms, die Restwelligkeit, optimiert.



Schaltstufenracks der Hochspannungs-Gleichstrom-Versorgungsanlage

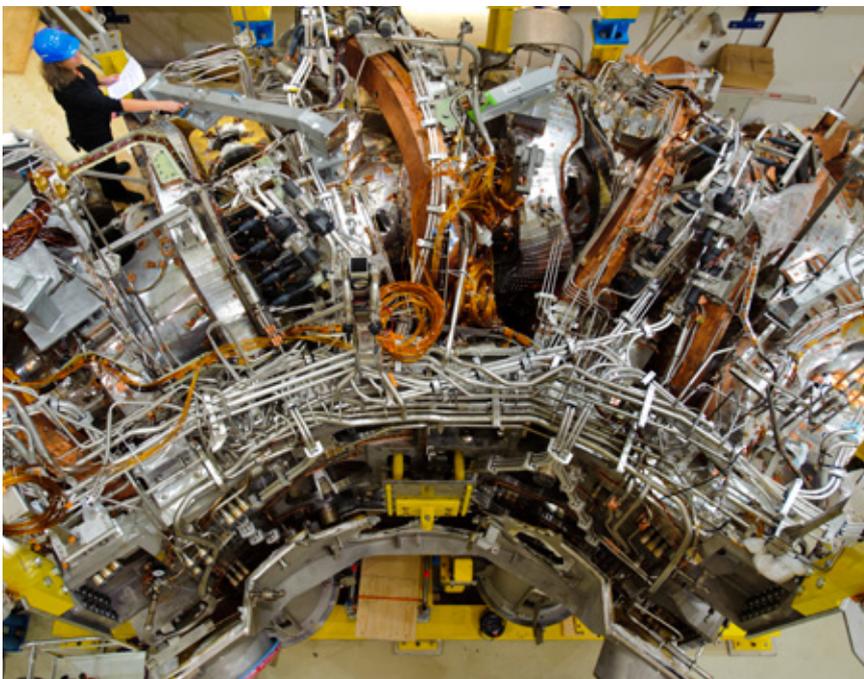
Mit den oben genannten Verbesserungen – im Rahmen dieses Projektes - haben sich die Hochspannungsanlagen der Firma Thomson Broadcast auf dem Weltmarkt besser durchsetzen können.

Kühlleitungen für die Einbauten im Plasmagefäß „Stählerne Rohrspaghetti“

Dockweiler AG, Neustadt-Glewe, Deutschland

In das Plasmagefäß des Wendelstein 7-X müssen insgesamt 4500 Meter Kühlwasserleitungen eingebaut werden, um die stark wärmebelasteten Wandelemente zu kühlen. Die komplexe Form des Plasmagefäßes bedingt entsprechend geformte Kühlrohrsysteme, die konventionell nur mit großem Aufwand hergestellt werden können. Vor allem die vielen genau ausgerichteten Verzweigungen kosten beim Verschweißen extrem viel Zeit. Die Firma Dockweiler fand eine Lösung: Das Unternehmen ist in der Lage, so genannte Aushalsungen mit Winkeln bis zu 60 Grad, anzubringen. Dazu wird durch ein gebohrtes Loch im Edelstahlrohr eine Metallkugel gezogen, wodurch ein Kragen entsteht. An dem nachbearbeiteten Kragen lässt sich das Abgangsrohr mittels definierter und hochevakuer Orbitalweißtechnik verbinden.

Kühlrohrsystem des Kryostaten (links)
und des Plasmagefäßes von Wendelstein 7-X



Dockweiler hat erst mit dem Auftrag für W7-X begonnen, dreidimensionale Rohrleitungen herzustellen. Dafür hat sich die Firma neue Vermessungs- und Biegetechnologien angeeignet sowie entsprechende Maschinen gekauft, was es ihr künftig ermöglicht, deutlich komplexere Rohrleitungssysteme zu fertigen. Als zusätzliche Anforderung musste sich die Firma Dockweiler erstmals mit den besonderen Qualitätsansprüchen der Ultrahochvakuumtechnik auseinandersetzen. Das dabei erworbene Know-how ermöglicht dem Unternehmen den Zugang zu neuen Geschäftsfeldern.

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

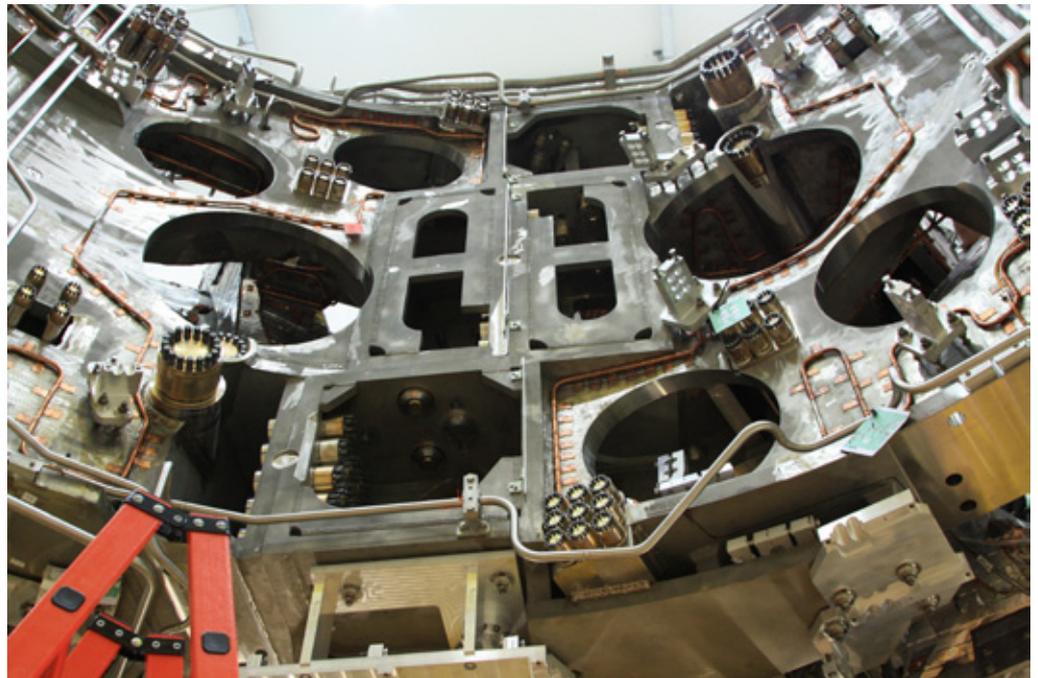
Dockweiler AG (Neustadt-Glewe, Deutschland)

Aufträge:

Kühlrohrsysteme für Plasmagefäß und Kryostat

CLP, Borgo San Dalmazzo, Italien

Bearbeitung des Zentralrings – „Mikrometer-Präzisionsarbeit“



Zentralring des Wendelstein 7-X

Die supraleitenden Magnetspulen des Wendelstein 7-X werden an einem massiven Zentralring festgeschraubt. Auf diesen Stahlring wirken hohe Kräfte von ca. 100 Tonnen. Deshalb müssen die zehn einzelnen Segmente des Ringes an ihren Schnittstellen extrem genau gefertigt werden. Zur mechanischen Bearbeitung dieser Metallflächen mit einer Genauigkeit von etwa 100 Mikrometern (100 Millionstel Meter) 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 mussten spezielle Techniken entwickelt werden, die trotzdem eine exakte und reproduzierbare Positionierung garantierten. Zusätzlich musste eine Thermostatisierung der Werkstätten implementiert werden, um die geforderte Bearbeitungsgenauigkeit zu erreichen. Zum Nachweis dieser Genauigkeit wurden gemeinsam mit CLP computergesteuerte Vermessungsverfahren erarbeitet und erfolgreich eingesetzt. Hinzu kommt die gemeinsame Entwicklung spezieller Tiefbohrtechniken für die Verbindung der Segmente untereinander mit langen Schrauben aus Spezialstahl.

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

CLP (Borgo San Dalmazzo, Italien)

Aufträge:

mechanische Bearbeitung der Zentralringmodule

Die Arbeiten am Zentralring des Wendelstein 7-X haben der Firma völlig neue Arbeitsbereiche und damit zusätzliche Auftragsfelder erschlossen. Dadurch gehört die Firma inzwischen zu den für ITER qualifizierten Firmen und hat bereits einen Auftrag für ITER erhalten.

Nordlock AG, Standort St. Gallenkappel, Schweiz

Die 10 einzelnen Segmente des oben beschriebenen Zentralrings mussten miteinander verschraubt werden. Die 70 supraleitenden Spulen wurden ebenfalls mit Schraubverbindungen an dem Ring befestigt. Diese Schraubverbindungen gewährten eine gewisse Flexibilität im Vergleich zu Schweißverbindungen. Während des Betriebs von Wendelstein 7-X werden sie sehr stark belastet, zum einen durch die magnetischen Kräfte zum anderen durch die extrem niedrige Einsatztemperatur von -270 Grad Celsius. Die Firma Nordlock AG verfügte über Schrauben aus hochfestem Inconel 718 mit Gewindedurchmessern von M20 bis M90 und Längen zwischen 100 und 1350 Millimetern. Allerdings entsprach der Reibungskoeffizient nicht den Ansprüchen für die Montage der Komponenten. Je höher der Reibungskoeffizient ist, desto höher muss die Kraft für das Anziehen der Schrauben sein. Daher entwickelte die Firma eine 2-fach-Feststoffbeschichtung für die Schrauben. Diese spezielle Entwicklung für Wendelstein 7-X und die gleichzeitige Verwendung von silberbeschichteten Schraubenmuttern und Druckscheiben führte zu einer Senkung des Reibungskoeffizienten auf 0,06 – zuvor lag dieser mit Spezialschmierstoffen bei 0,12 bis 0,14. Außerdem bleibt dieser hervorragende Reibungskoeffizient über mehrere Spannvorgänge konstant, sodass nicht Hunderte Schrauben bei eventuellen Neumontagen nachgeschmiert werden mussten. Der niedrige Reibungskoeffizient ermöglichte zusätzlich auch den Einsatz von kleineren Drehmomentschlüsseln, was die Montage im sehr beengten Bauraum am Wendelstein 7-X erleichterte.

Weiterentwicklung von Schraubverbindungen „Geschraubt und nicht geschweißt“

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 es zu den Standardverfahren bei der Nordlock AG.

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

Nordlock AG (ehemals P&S Vorspannsysteme AG), (St. Gallenkappel, Schweiz)

Aufträge:

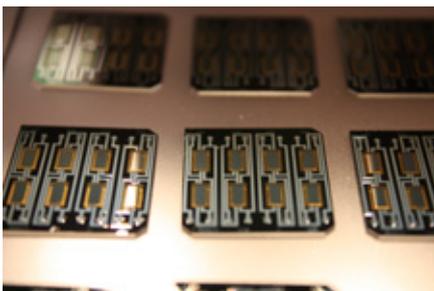
Weiterentwicklung des SUPERBOLT-Systems



Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH, Deutschland

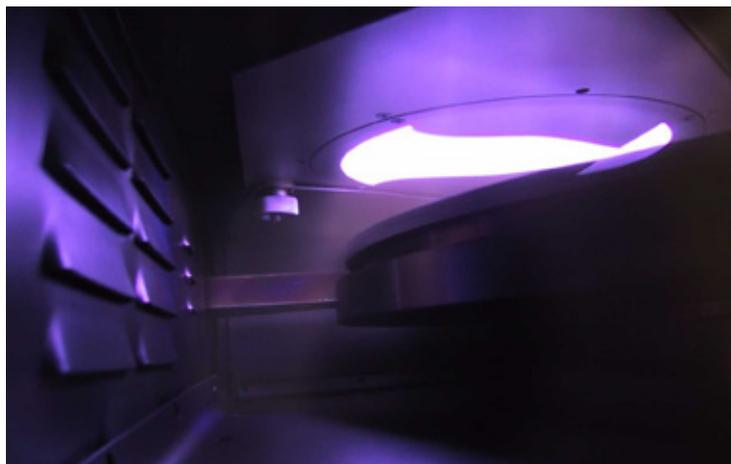
Entwicklung eines optimierten Bolometerdetektors „Platin dick aufgetragen“

Die anspruchsvollen Randbedingungen für Diagnostiken im Fusionsexperiment ITER stellen die Entwicklung der Bolometerdiagnostik vor einige Herausforderungen. Der Detektor muss nicht nur bei höheren Temperaturen betrieben werden, als das in bisherigen Fusionsexperimenten der Fall war, sondern wird auch einer erheblich größeren Belastung durch Neutronen ausgesetzt sein. Daher war es nötig, nach neuen Materialien für die Detektoren zu suchen. Aufgrund der geringen Einfangsquerschnitte für Neutronen sollte Platin als Material für Absorber und Leiterbahnen zum Einsatz kommen, die auf einer Membran aus Silizium-Nitrid aufgebracht werden. Das Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH (IMM) stellte seine Kompetenz auf dem Gebiet der Dünnschichttechnologie und die erforderliche Infrastruktur zur Verfügung. In einem auf 3,5 Jahre ausgelegten Entwicklungsauftrag wurden bisher alle erforderlichen Prozessierungsschritte entwickelt, um einen 12 Mikrometer dicken Platin-Absorber mit einer Oberfläche von 6 Quadratmillimetern galvanisch auf eine 3 Mikrometer dünne und 12,5 Quadratmillimeter große Silizium-Nitrid-Membran in einer aus einem Siliziumwafer herausgeätzten Grube abzuscheiden. Gemeinsam mit dem IPP werden die Prototypen nun in einem engen Wechselspiel mit dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching getestet und weiter optimiert, damit deren Parameter optimal an die Anforderungen von ITER angepasst werden.



Optimierter Bolometerdetektor mit Platin-Absorber zur Auslieferung

Plasmaleuchten während der Sputterbeschichtung



Fakten:

Forschungseinrichtung:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Industriepartner:

Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH
(Mainz, Deutschland)

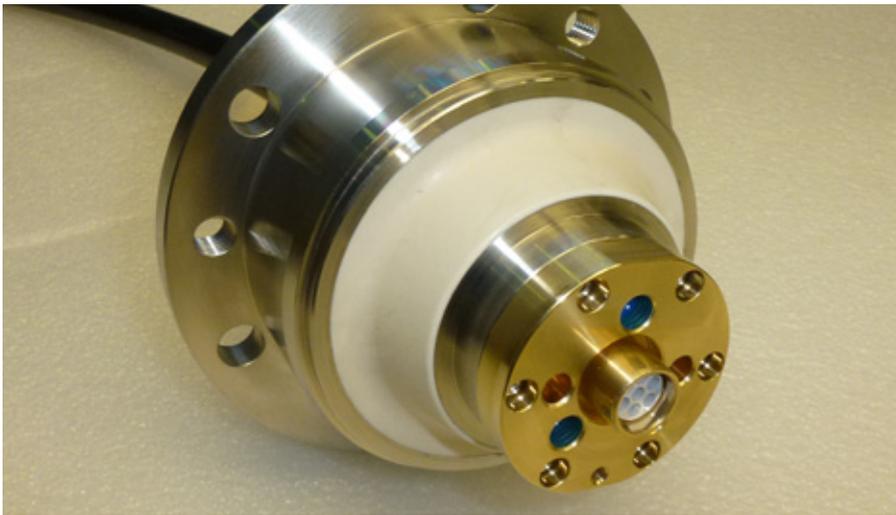
Aufträge:

Entwicklung eines optimierten Bolometerdetektors für die Verwendung in ITER

Üblicherweise wird die Platin-Galvanik in der Schmuckindustrie eingesetzt, allerdings nur bis zu Dicken von ca. 1 Mikrometer. Das IMM entwickelte für die Herstellung der Bolometerdetektoren Prozessierungsschritte, die erstmals weltweit zu mehr als 10 Mikrometern dicken galvanisch abgeschiedenen Platin-Schichten führten und ihm somit zu einem Alleinstellungsmerkmal verhalfen. Weiterhin wurden einzelne Prozesse für die Be- und Entlackung im Zusammenspiel für die bei der Platin-Galvanik verwendeten Bäder weiterentwickelt, sodass sich das IMM zusätzliche Kompetenz auf diesem Gebiet erarbeiten konnte.

Die ITER Kabel-Durchführung „Antworten aus dem Vakuum – spannungsgeladen und sicher“

ODU Steckverbindingssysteme GmbH & Co. KG
Mühdorf/Inn , Deutschland



Stecker der Instrumentierungs-Durchführung mit Spezialisierung (weiß/blau) zur hochspannungsfesten Übertragung

Um eine Anlage zu betreiben und zu überwachen, müssen Signale wichtiger Komponenten gemessen werden. Die Übertragung der Signale vom Entstehungsort zum Überwachungspunkt stellt – je nach Anwendungsfall – eine große Herausforderung dar und erfordert funktional angepasste Lösungen.

Bei dem internationalen Tokamakexperiment ITER können diese Signale sehr hohe Spannungen von mehreren 10.000 Volt haben. Sie müssen aus dem Vakuum des Kryostaten in die Schaltwarte transportiert werden. Um teure Betriebsunterbrechungen zu vermeiden, muss sichergestellt werden, dass hierbei das Vakuum des Kryostaten bestehen bleibt und Spannungsspitzen, wie sie bei der Schnellabschaltung der Magnete entstehen können, durch- und überschlagsicher abgefangen werden. Kabel-Durchführungen für diesen Einsatz sind bisher kommerziell nicht erhältlich.

Fusionsreaktoren sind komplexe Geräte und benötigen eine sehr große Zahl von Kabel-Durchführungen. Gemeinsam mit der auf Steckverbindungen spezialisierten Firma ODU wurde daher ein für die industrielle Großfertigung geeignetes Design entwickelt und umgesetzt. Die Hochspannungskabel-Durchführung, bestehend aus einer mit dem Kryostaten zu verbindenden gasdichten Buchse und dem passenden Stecker, verfügt über eine spezielle mehrschichtige, hochspannungsfeste Isolation aus Glasfaserkunststoff, in die mehrere Signalleitungen eingegossen sind.

Die extremen Anforderungen an diese Kabel-Durchführung erforderten bei der Entwicklung ein enges Zusammenspiel von wissenschaftlichem Know-How und Fertigungstechnik. Der aus dieser effektiven Zusammenarbeit entstandene Prototyp konnte bereits erfolgreich getestet werden.

Fakten:

Forschungseinrichtung:

Karlsruher Institut für Technologie

Industriepartner:

ODU Steckverbindingssysteme GmbH
& Co. KG

(Mühdorf/Inn, Deutschland)

Aufträge:

Entwicklung einer vakuumtauglichen
Hochspannungs-Durchführung für ITER

RASI Maschinenbau GmbH, Illingen, Deutschland

Das supraleitende Bussystem für Wendelstein 7-X – ein überdimensionaler Kabelbaum

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 zum Abkühlen auf die benötigte Temperatur von -270 Grad Celsius. 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 müssen diese mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern vorgefertigt werden. Dafür musste eine computergesteuerte Biegemaschine qualifiziert werden. Die Firma RASI hat zu diesem Zweck gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich eine Maschine entwickelt, die Biegungen in zwei Richtungen erlaubt. Normalerweise wird eine variable Biegerichtung durch Drehen des Werkstücks um seine Achse in der Maschine ermöglicht. Hier allerdings handelt es sich um bereits vorgeformte Teile von mehreren Metern Länge, die beliebig im Raum – auch unter die Bodenebene – schwenken würden. Die neuartige Zwei-Richtungs-Biegemaschine erlaubt immer die Schwenkrichtung nach oben und machte damit die Fertigung überhaupt erst möglich.

Geometrieprüfung der geformten Supraleiter



Fakten:

Forschungseinrichtung:

Forschungszentrum Jülich GmbH

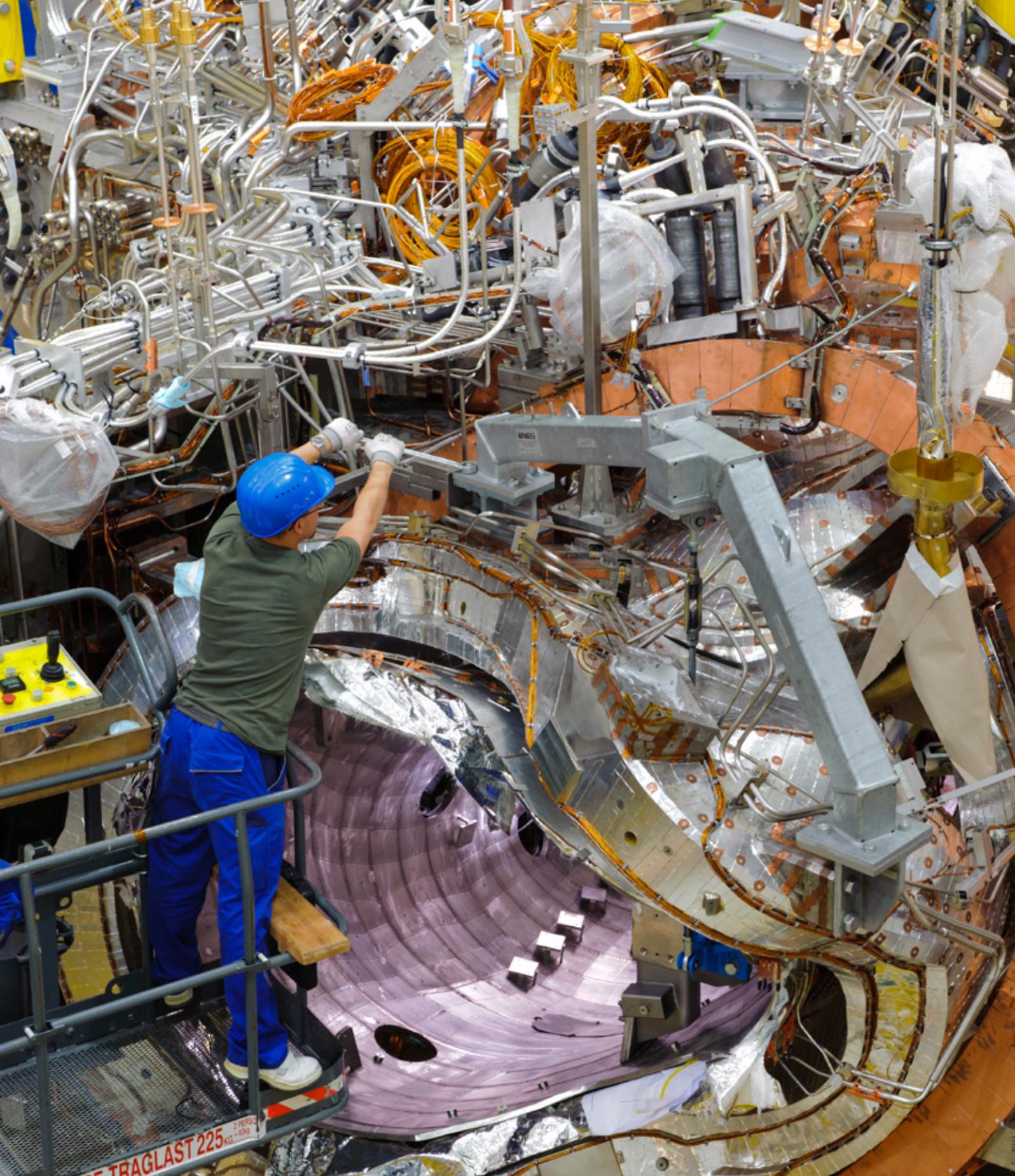
Industriepartner:

RASI Maschinenbau GmbH
(Illingen, Deutschland)

Aufträge:

Entwicklung einer computergesteuerten Biegemaschine für zwei Biegerichtungen für die Verwendung beim Aufbau des supraleitenden Busleitersystems von Wendelstein 7-X.

Die bei der Weiterentwicklung der Produktpalette gesammelten Erfahrungen sind wertvoll für künftige kundenspezifische Entwicklungen des Herstellers. Die neue flexiblere Maschine hat bereits Interessenten außerhalb der Fusionsforschung gefunden.



Impressum:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Standort Greifswald
Wendelsteinstraße 1
17491 Greifswald
info@ipp.mpg.de, www.ipp.mpg.de

Fotos: Babcock Noell (S.16), FANUC Robotics (S. 18), Wolfgang Filser (S. 1, 2, 6, 7 un., 9 ob., 21 li., 27), Dietmar Gust (S. 4, 15 ob.), Forschungszentrum Jülich (S.26), Steffen Groß (S. 28), Michael Herdlein (S. 11), IMM (S. 24), IPP (S. 5, 7, 10 re., 14, 20, 22, 23), KIT (S. 13, 19, 25), Andre Künzelmann (S. 15 un.), Plansee SE (S. 12), Reuter Technologie (S. 10 li.), Anja Richter Ullmann (S. 8, 17), Thales (S. 9 un.); Abb.: IPP (S. 3, 4, 5, 21 re.)

Gestaltung: Progress4 Druck: Druckhaus Panzig, Greifswald



Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik

