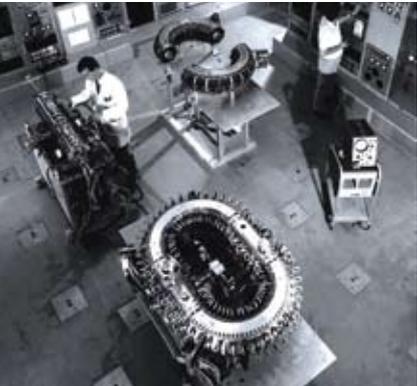
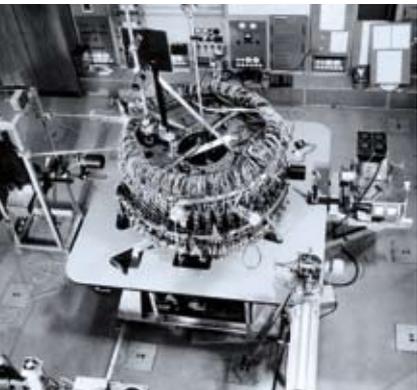


# 3 STELLARATOREN



▲ Abb. 1



▲ Abb. 2

**Abb. 1:** Die ersten IPP-Stellaratoren: Wendelstein 1-A, der erste Stellarator im IPP, ging 1960 in Betrieb (vorne), rechts hinten: Wendelstein 1-B, links: Wendelstein 4.

**Abb. 2:** Wendelstein 2-A, eine rein torusförmige Maschine.

**Abb. 3:** Messung der Teilchendichte in Wendelstein 2-A bei verschiedener Verdrillung des Magnetfeldes (iota).

**Abb. 4:** Wendelstein 2-B wurde 1970 in Betrieb genommen.

**Abb. 5:** Auf das Plasmagefäß von Wendelstein 7-A werden spiralförmige Magnetspulen montiert.

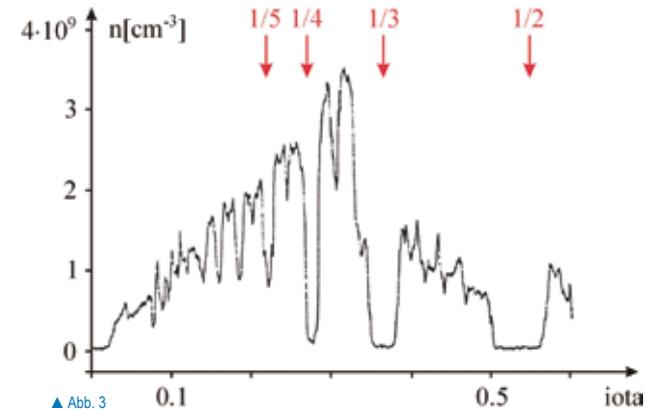
## Von Wendelstein 1-A zu Wendelstein 7-X

THOMAS KLINGER

Der erste Stellarator des IPP, Wendelstein 1-A, ging 1960, noch im Gründungsjahr des Instituts in Betrieb, war jedoch im Münchner Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik aufgebaut (Abb. 1). Der Name „Wendelstein“ bezieht sich auf den Hausberg der Münchner in den Bayerischen Alpen und knüpft zugleich an das bis 1958 geheime US-Fusionsprojekt „Matterhorn“ in Princeton an. Hier hatte 1951 der US-amerikanische Astrophysiker Lyman Spitzer Jr. das Stellaratorkonzept vorgeschlagen<sup>1</sup>.

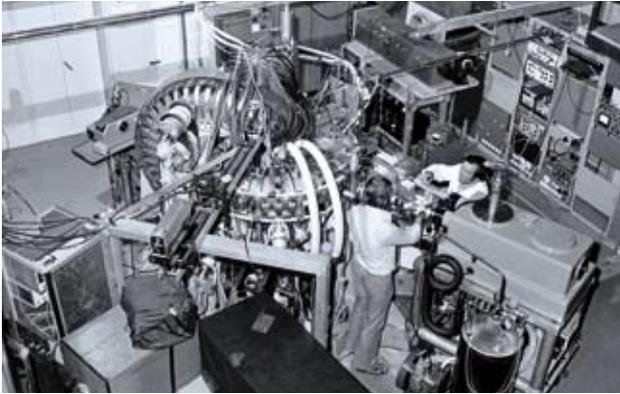
Auf Wendelstein 1-A – mit einem kleinen Plasmadius von 2,5 Zentimetern – folgte der ebenso große Wendelstein 1-B. Ziel der Anlagen war es, das Einschlussverhalten der Plasmen systematisch zu untersuchen. Rasch bemerkte man, dass die zunächst gewählte „Rennbahnform“ – gerade Teilstücke, die zwischen zwei halbkreisförmige Gefäßstücke eingesetzt wurden – von Nachteil ist. 1965 entstand der Nachfolger Wendelstein 2-A infolgedessen als rein torusförmige Maschine (Abb. 2). Zunächst wurden Plasmen aus Alkali- bzw. Erdalkalimetallen – meist Cäsium oder Barium – untersucht, die durch Kontaktionisierung an einer heißen Metalloberfläche erzeugt und auch auf moderate Temperaturen aufgeheizt wurden. Sehr bald wurde die entscheidende Bedeutung der so genannten Rotationstransformation – ein Maß für die Verdrillung der Feldlinien – für den Einschluss erkannt.

Inzwischen hatte der in Princeton gebaute Model-C-Stellarator die Erwartungen an die Einschlussgüte der Stellaratoren gewaltig enttäuscht: Statt eines von Diffusion, also nur durch Teilchen-



▲ Abb. 3

stöße bestimmten Transportes musste man viel größere Verluste feststellen, die so genannte „Bohm-Diffusion“. Mit Wendelstein 2-A konnten die Wissenschaftler, die inzwischen samt ihren Maschinen im IPP in Garching angesiedelt waren, nachweisen, dass Stellaratoren sehr wohl den guten magnetischen Einschluss besitzen können, der von der Theorie vorhergesagt wurde, und nicht den schlechten, der Bohm-Diffusion zugeschrieben, wie er am Model-C-Stellarator beobachtet wurde. Das Aufsehen erregende Resultat wurde von US-Kollegen als „Munich mystery“ bezeichnet, worin sowohl Bewunderung als auch Skepsis mitschwang. Abbildung 3 zeigt eine klassisch gewordene Messung an Wendelstein 2-A. Aufgetragen ist die Teilchendichte des eingeschlossenen Plasmas gegen die Rotationstransformation des magnetischen Feldes. Die Plasmadichte bricht jeweils



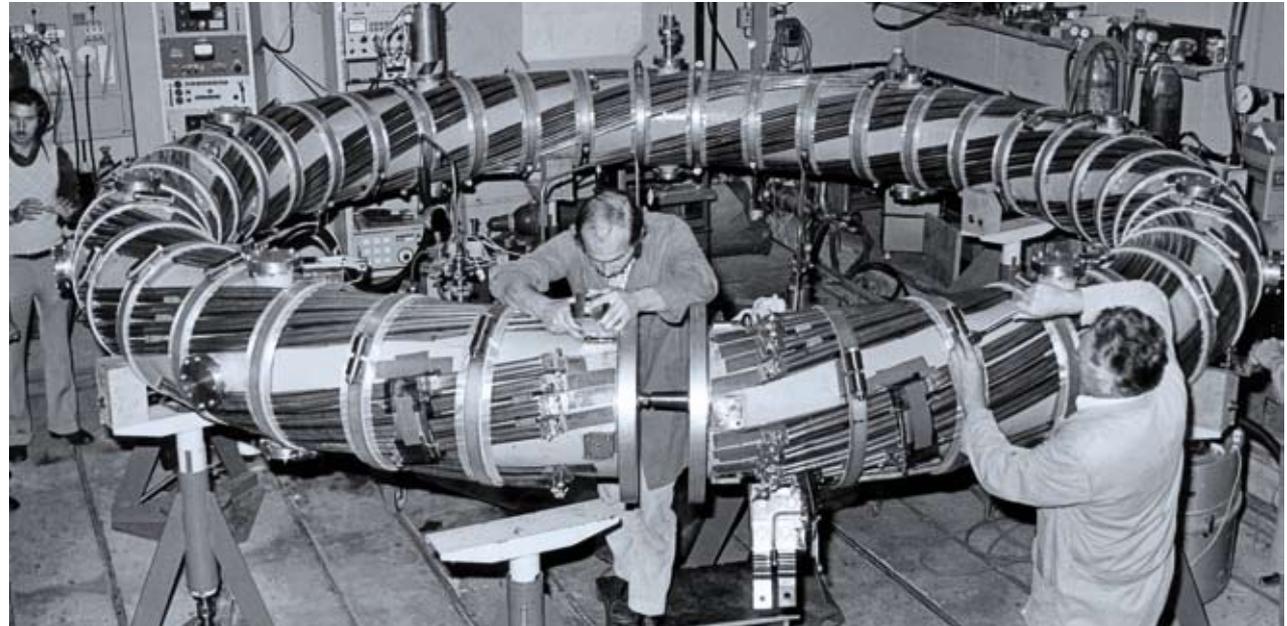
▲ Abb. 4

dramatisch ein, sobald die Rotationstransformation in der Nähe ganzzahliger Brüche  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$ , ... kommt. Diese Einbrüche entsprechen dem schlechten Einschluss, wohingegen zwischen diesen Werten guter Einschluss entsprechend der „klassischen“ Diffusionstheorie gefunden wurde.

Dieses Verhalten wird mehr oder minder bei allen Stellaratoren der Wendelstein-Linie gefunden<sup>2</sup>. Bereits früh wurden als Ursache magnetische Inseln ausgemacht, die sich in der Nähe ganzzahliger Werte der Rotationstransformation besonders leicht ausbilden können.

Der 1970 in Betrieb gegangene Wendelstein 2-B (Abb. 4) besaß die gleichen Dimensionen wie sein Vorgänger 2-A. Erstmals wurden nun aber Wasserstoff-Plasmen untersucht, die – wie in Tokamaks – von einem per Induktion eingekoppelten elektrischen Strom erzeugt wurden. Zudem wurde an Wendelstein 2-B damit begonnen, das Plasma mit Hilfe von Mikrowellen aufzuheizen – der Anfang einer langen Erfolgsgeschichte. Mitte der 1970er Jahre konnte mit Wendelstein 2-B gezeigt werden, dass der Stellarator in seinem Einschlussverhalten durchaus mit einem entsprechenden Tokamak mithalten kann. Weltweit hatte jedoch zu dieser Zeit der Siegeszug des einfacher berechenbaren Tokamak bereits begonnen.

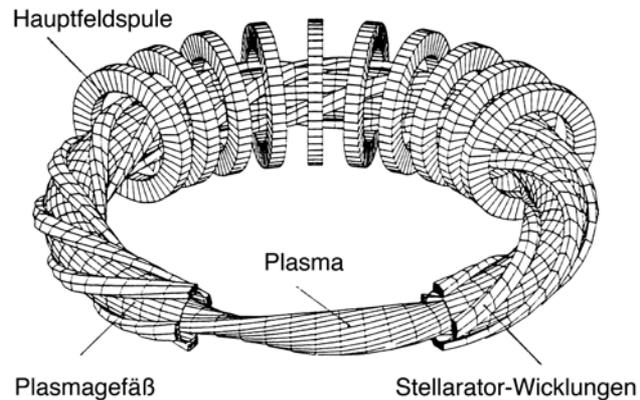
Wendelstein 3 und 4 waren lineare Anlagen mit einer Länge von 0,8 bzw. einem Meter und mit einem Plasmaradius von 2,5 bzw. 10 Zentimetern. Auch Wendelstein 5 war kein Stellara-



▲ Abb. 5

tor, sondern ein Oktopol von etwa 1,3 Metern Durchmesser und 0,5 Metern Höhe – vier an Stützen aufgehängte stromführende Ringe. Sein Einschlussvermögen sollte mit dem eines Quadrupols, Wendelstein 6, verglichen werden. Die Vorbereitungen für die mit levitierten supraleitenden Innenringen geplante Anlage wurden 1973 eingestellt. Erst mit der Zahl sieben wurde unter dem Namen Wendelstein wieder ein Stellarator gebaut. Wendelstein 7-A (Abb. 5) war mit seinen 4 Metern Durchmesser und seinem 3,4 Tesla starken Feld der erste „erwachsene“ Stellarator des IPP. Ihm

# 3 STELLARATOREN

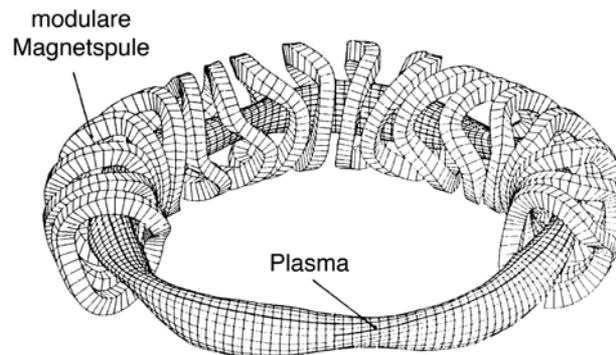


**Abb. 6:** Schema: Der klassische Stellarator Wendelstein 7-A (oben) mit Spiralwicklungen und ebenen Spulen sowie ein „Advanced Stellarator“ wie Wendelstein 7-AS mit modularem Spulensystem (unten).

**Abb. 7:** Eine der 45 nicht-ebenen Stellarator-Spulen von Wendelstein 7-AS (Foto: IPP, Peter Ginter).

**Abb. 8:** Ein senkrechter Schnitt durch das Magnetfeld, aufgenommen mit einem Elektronenstrahl. Man erkennt gut die wie Zwiebelschalen ineinander geschachtelten magnetischen Flussflächen, die von den spiralförmig umlaufenden Feldlinien gebildet werden.

**Abb. 9:** Spulenkranz von Wendelstein 7-AS.

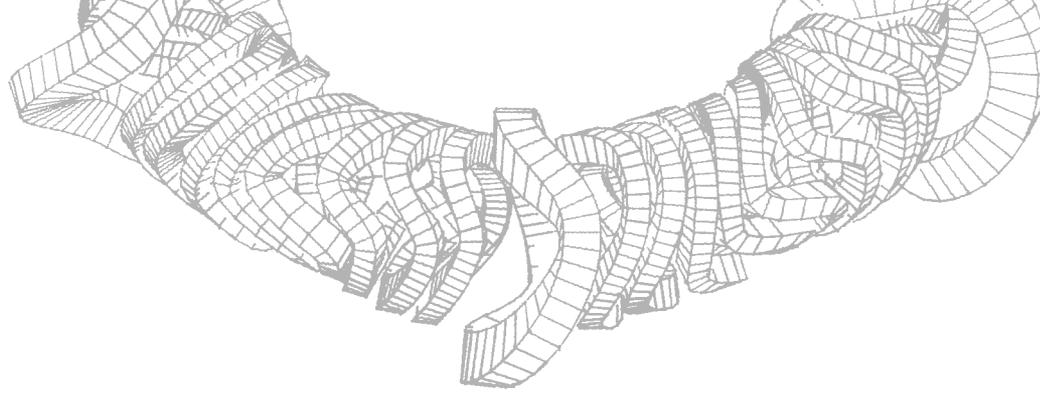


▲ Abb. 6

standen alle drei wesentlichen Methoden zur Plasmaerzeugung und -aufheizung zur Verfügung: Stromheizung, Mikrowellenheizung und Heizung durch neutrale energiereiche Teilchenstrahlen (siehe Kapitel 7).

Ursprünglich sollte Wendelstein 7-A bereits die herausragende Eigenschaft des Stellarators nachweisen können, den Dauerbetrieb. Er sollte ein heißes Plasma beliebig lange magnetisch einschließen können. Da sich Magnetspulen aus Kupfer beim Erzeugen hoher magnetischer Felder stark aufheizen, sollten supraleitende Spulen zum Einsatz kommen. Fast auf den absoluten Nullpunkt heruntergekühlt, können sie einen Strom verlustlos und damit ohne Erwärmung tragen. Allerdings mussten diese Pläne nach einigen technischen Problemen aufgegeben werden und Wendelstein 7-A wurde mit Kupferspulen realisiert – und die Untersuchung des Dauerbetriebs weit in die Zukunft verschoben.

Trotz dieser Anfangsprobleme wurde Wendelstein 7-A in seinen zehn Betriebsjahren ein überwältigender Erfolg. 1980 konnte hier weltweit zum ersten Mal das „reine“ Stellaratorprinzip – Einschluss ohne Plasmastrom – erfolgreich mit einem heißen Plasma demonstriert werden. Dies führte wenig später zu erstaunlichen Leistungsdaten des eingeschlossenen Plasmas<sup>3</sup>. Als Erklärung konnte die entscheidende Bedeutung des radialen elektrischen Feldes für die Teilchendiffusion in Stellaratoren herausgearbeitet werden. Allerdings wurde an Wendelstein 7-A auch klar, dass die Kombination aus ebenen und spiralförmig verwundenen Spulen keine Zukunft hat: Die Kräfteverteilung zwischen die-

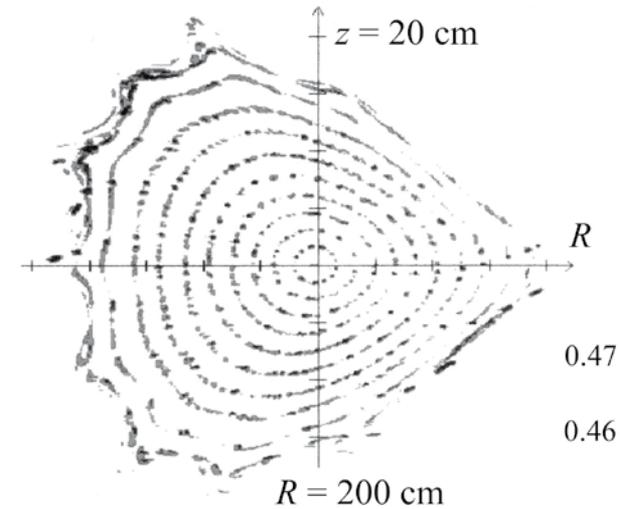


▲ Abb. 9



(Foto: IPP, Peter Cramer)

▲ Abb. 7



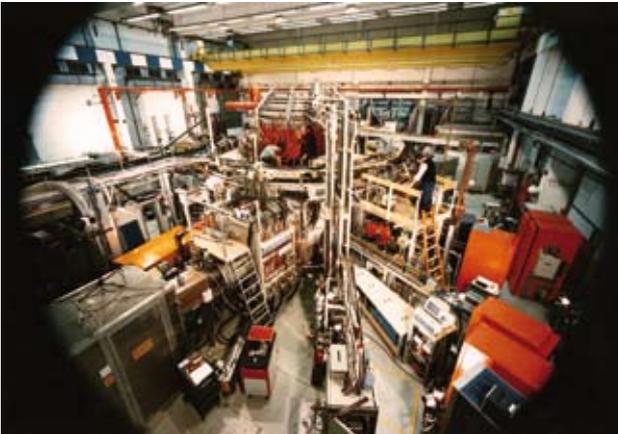
▲ Abb. 8

sen Spulen ist problematisch, die den ganzen Torus umwindende Spiralwicklung ist in einem Kraftwerk kaum vorstellbar und – am wichtigsten – das Spulensystem bietet zu wenig Flexibilität, um das Magnetfeld optimal an die Bedürfnisse der Physik anzupassen. Diese Einsichten führten zu dem späteren Markenzeichen der IPP-Stellaratoren, den modularen, nicht-ebenen Spulen<sup>4</sup>.

Motiviert durch die Erfolge von Wendelstein 7-A wurde das Stellaratorprinzip im IPP systematisch weiterentwickelt. Weil

man angesichts der komplexen, dreidimensionalen Geometrie des Stellarators rasch an die Grenzen der Papier- und Bleistift-Physik stieß, wurden die ersten leistungsfähigen Großrechner immer wichtiger. Die modularen Spulen zur Erzeugung des Magnetfeldes spielten eine Schlüsselrolle. Mit ihrer gekrümmten Form erzeugen die Spulen (Abb. 7, 8, 9) zugleich das torusförmige Feld als auch dessen Verdrillung. Mehr noch, lässt sich mit den nicht-ebenen Spulen das Magnetfeld des Stellarators relativ frei formen, so dass dessen lokale Stärke und Krümmung

# 3 STELLARATOREN



▲ Abb. 10

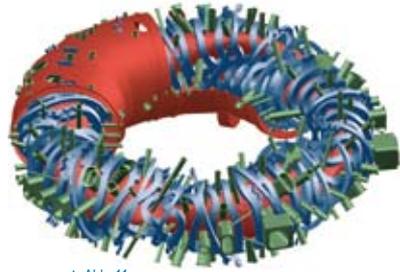
optimal an die physikalischen Gesetze des heißen Plasmas angepasst werden konnte. Man spricht in diesem Zusammenhang von „Optimierung“ (siehe Kapitel 4). Wendelstein 7-AS war teilweise optimiert; das „AS“ im Namen steht für „Advanced Stellarator“. So konnten die so genannten Pfirsch-Schlüter-Ströme, die von Dieter Pfirsch und Arnulf Schlüter im IPP vorhergesagt wurden, weitgehend reduziert werden, was den Gleichgewichtszustand des Stellaratorplasmas erheblich besser und damit für hohen Plasmadruck belastbarer macht.

Die Ergebnisse, die mit Wendelstein 7-AS erzielt wurden, stellen in vielerlei Hinsicht einen Durchbruch dar: Die Praxistauglichkeit der modularen Spulen wurde bewiesen, was für ein künftiges Stellaratorkraftwerk von größter Bedeutung ist. Es wurden zahlreiche Rekordwerte erzielt, so Temperaturen von 68 Millionen Grad Celsius für die Plasmaelektronen bzw. 17,5 Millionen Grad für die -ionen sowie eine Plasmadichte von  $4 \cdot 10^{20}$  Teilchen pro Kubikmeter – alles erstaunlich gute Werte für eine relativ kleine Versuchsanlage mit kaum mehr als einem Kubikmeter Plasmavolumen<sup>6</sup>.

Um diese Parameter alle zugleich erreichen – und übertreffen – zu können, war allerdings eine Anlage mit größerem Volumen nötig. Das Konzept der nicht-ebenen Spulen wurde daher konsequent weiterverfolgt und die Optimierung des Stellaratorfeldes mit Hilfe leistungsfähigerer Supercomputer vorangetrieben. Ergebnis ist der vollständig optimierte Stellarator Wendelstein 7-X (Abb. 11). Neben anderen wesentlichen Verbesserungen

wurde hier vor allem auch der magnetische Einschluss schneller Plasmateilchen optimiert, was bei Wendelstein 7-AS noch fehlte. Mit supraleitenden Spulen will die Anlage zudem die wesentliche Stellaratoreigenschaft zeigen, den Dauerbetrieb. Die Baugenehmigung für Wendelstein 7-X wurde 1996 erteilt; zurzeit entsteht die Anlage – im Zuge der Wende – an der nordöstlichen Ostseeküste im 1994 gegründeten IPP-Teilinstitut in Greifswald.

Parallel dazu wurde in Garching Wendelstein 7-AS weiter betrieben und entwickelt. 1992 konnte hier das am Tokamak ASDEX entdeckte H-Regime mit verbessertem magnetischen Einschluss gefunden werden – erstmals in einem Stellarator. Man entschloss sich daher, den Kontakt zwischen Plasma und Wand zu verbessern und einen so genannten Inseldivertor einzubauen. Das Funktionsprinzip des Inseldivertors ist dem des toroidalen Divertors im Tokamak (siehe Kapitel 5) sehr ähnlich, jedoch der dreidimensionalen Geometrie des Stellaratorfeldes angepasst. Dabei werden besondere Randbereiche durchschnitten, die magnetischen Inseln, die im Stellaratorfeld eine natürliche Begleiterecheinung sind. Nach Einbau des Divertors haben sich die Plasmaeigenschaften des Wendelstein 7-AS nochmals dramatisch verbessert. Es wurde eine neue Betriebsweise, das HDH-Regime („High Density H-Regime“), gefunden, das zugleich Verunreinigungen im Plasmazentrum vermeidet und den Energieeinschluss verbessert<sup>7</sup>. Die Arbeiten an Wendelstein 7-AS wurden im Sommer 2002 beendet, um Kräfte für den Aufbau von Wendelstein 7-X freizusetzen.

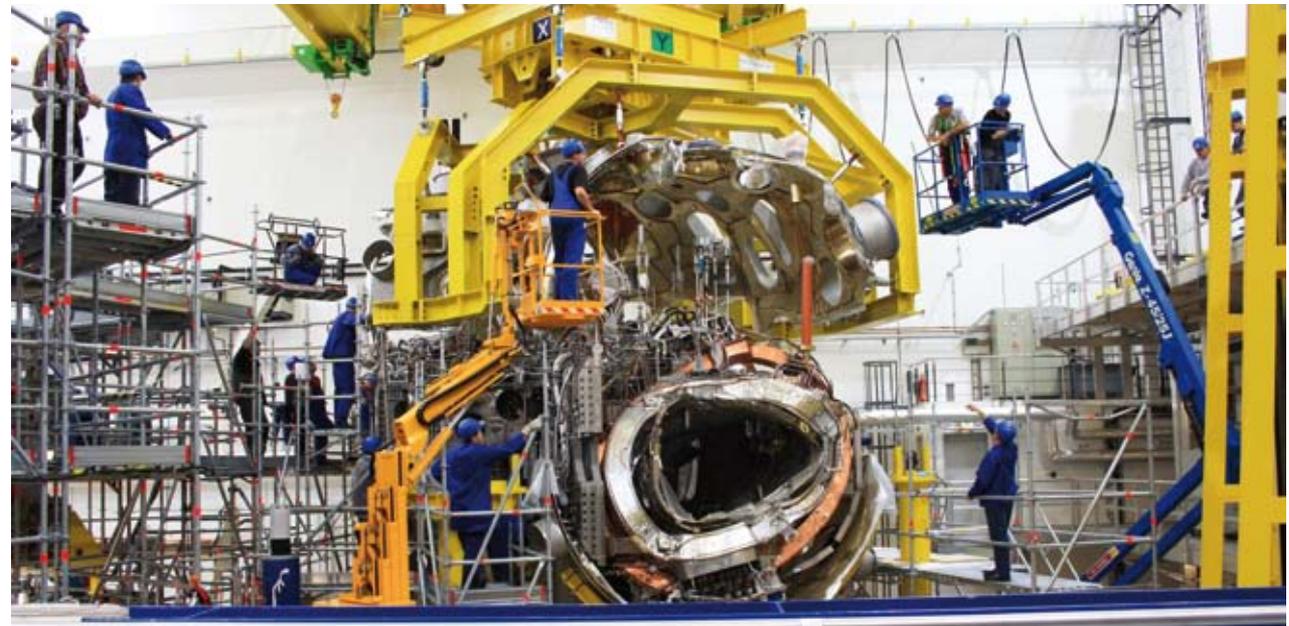


▲ Abb. 11

**Abb. 10:** Die Experimentieranlage Wendelstein 7-AS.

**Abb. 11:** Computergrafik: Kryostat, Magnetspulen und Plasmagefäß der Fusionsanlage Wendelstein 7-X.

**Abb. 12:** Montage von Wendelstein 7-X: In der Experimentierhalle wird gerade ein Stück der wärmeisolierenden Außenhülle über ein Modul der Anlage gehoben.



▲ Abb. 12

Technische Probleme machten die ursprüngliche Vorstellung zunichte, Wendelstein 7-X im Jahr 2008 in Betrieb nehmen zu können. Nach mehreren Revisionen des Zeitplans konnte der Aufbau der technisch hochkomplexen Anlage Dank eines gewaltigen Kraftaktes des gesamten Instituts auf die richtige Spur gesetzt werden. Inzwischen sind alle Hauptkomponenten

geliefert und erfolgreich getestet, allen voran die 70 supraleitenden Magnetfeldspulen. Der Zeitplan ist seit fast drei Jahren stabil, der Abschluss der Montage (Abb. 12) für Mitte 2014 vorgesehen<sup>8</sup>. Nach der Inbetriebnahme ist ab 2015 eine erste, zweijährige Experimentierphase geplant, während der die optimale Plasmaerzeugung auszuarbeiten ist<sup>9</sup>. Anschließend soll

ein hochbelastbarer Divertor eingebaut werden. Mit seiner Hilfe kann dann ab 2019 das – von keiner Versuchsanlage der Fusionsforschung bisher erreichte – Hauptziel von Wendelstein 7-X in Angriff genommen werden, der Dauerbetrieb.