

Wendelstein 7-X – Ein Konzept für ein stationäres Fusionsplasma

R. C. Wolf und das W7-X Team*

Einführung

Der magnetische Einschluss von Hochtemperaturplasmen gilt als eines der aussichtsreichsten Konzepte für ein Fusionskraftwerk. Es verspricht klimaneutrale Stromerzeugung bei günstigen Umwelt- und Sicherheitseigenschaften. Die optimale Reaktionstemperatur für den Brennstoff, ein Gemisch aus den Wasserstoff-Isotopen Deuterium und Tritium, liegt bei 10^8 Kelvin, bei der die beteiligten Gase als Plasma vorliegen. Die große thermische Energie der Reaktionsprodukte - Heliumkerne und Neutronen - wird über Wärmetauscher zur Stromerzeugung genutzt. Die Neutronen erzeugen zudem aus Lithium den Brennstoffbestandteil Tritium, das aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit auf der Erde nur in Spuren vorkommt. Die Grundstoffe Deuterium und Lithium sind jedoch weltweit in großen Mengen vorhanden.

Als einziges „Abgas“ entsteht der klimaneutrale Wertstoff Helium. Zwar können Neutronen umgebende Strukturen aktivieren, eine geeignete Wahl der Grundmaterialien verhindert jedoch die Entstehung langlebiger Abfälle. Heute werden Materialien so optimiert, dass eine Wiederverwendung nach etwa 100 Jahren realistisch erscheint. Fusionskraftwerke werden Grundlastelektrizität bereitstellen. Mit einer elektrischen Leistung von einem Gigawatt eignen sie sich besonders für die Versorgung großer Städte oder Industrieanlagen. In einem Energiesystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energieträger könnte die Fusion Prozesswärme mit hohen Temperaturen bereitstellen, wie sie z. B. für die Erzeugung synthetischer Treibstoffe oder Wasserstoff erforderlich ist.

Die internationale Fusionsforschung verfolgt im Wesentlichen zwei Anlagentypen: Tokamak und Stellarator. Beide basieren auf Magnetfeldlinien, die mit einer helikalen Verschraubung (einer sogenannten Rotationstransformation) auf toroidal ineinander geschachtelten Flussflächen verlaufen. Anlagen, die nach dem „Tokamak“-Prinzip arbeiten, erzeugen die für den Plasmaeinschluss notwendige Magnetfeldanordnung mit Hilfe von Magnetfeldspulen und einem toroidalen Plasmastrom. In den größten Tokamaks wurden Fusionsbedingungen erreicht; eine positive Leistungsbilanz erfordert jedoch größere Plasmen. Mit dem internationalen Projekt ITER, zurzeit in Bau in Cadarache/Frankreich, will man nun erstmalig eine positive Leistungsbilanz nachweisen [2]. Zentrale Forschungsaufgaben der nächsten Jahre sind die Vertiefung des physikalischen Verständnisses und die Entwicklung geeigneter Betriebsszenarien für ITER und ein nachfolgendes Demonstrationskraftwerk. Eigenschaften solcher Plasmen orientieren sich an einem ökonomischen Einsatz. Dabei will man stabile Plasmen hohen Drucks und hoher Dichte erzeugen und zum Verlängern der Brenndauer den induktiv erzeugten Plasmastrom zumindest teilweise ersetzen. Hinzu kommen möglichst wandschonende Energie- und Teilchenabfuhr sowie ein geschlossener Brennstoffkreislauf. Beides ist eng verknüpft mit der Entwicklung von Materialien und Systemlösungen für die Komponenten in der Brennkammer, die wiederum Lebensdauer und Sicherheitsaspekte beeinflussen.

Der optimierte Stellarator Wendelstein 7-X

Parallel zum Tokamak soll die Forschungsanlage Wendelstein 7-X (W7-X) die attraktiven Eigenschaften des „Stellarator“-Konzepts verifizieren [3]. Tokamaks und Stellaratoren teilen

* Autorenliste siehe [1]

physikalische Gemeinsamkeiten und können sich wechselseitig gleichartiger Technologien bedienen. Daneben ergänzen sie sich perfekt, indem sie jeweils mit eigenen Stärken Entwicklungsrisiken der anderen Linie erheblich verringern. Da Stellaratoren im Unterschied zu Tokamaks [4] für den Einschluss des Plasmas ohne Plasmastrom betrieben werden können, können sie das Plasma ohne großen Zusatzaufwand im Dauerbetrieb aufrechterhalten. Dieser Umstand ist attraktiv für eine möglichst ökonomische Stromerzeugung. Zudem verhindert das Fehlen eines (starken) toroidalen Plasmastroms die Entstehung stromgetriebener Plasmainstabilitäten, die in Tokamaks auch zum plötzlichen Abriss des Plasmastroms (sogenannten Disruptionen) und - damit verbunden - zu starken Belastungen der Anlage führen können. In Stellaratoren können auch wesentlich höhere Plasmadichten erreicht werden, was sich ebenfalls positiv auf die ökonomische Nutzung eines Fusionskraftwerks auswirkt.

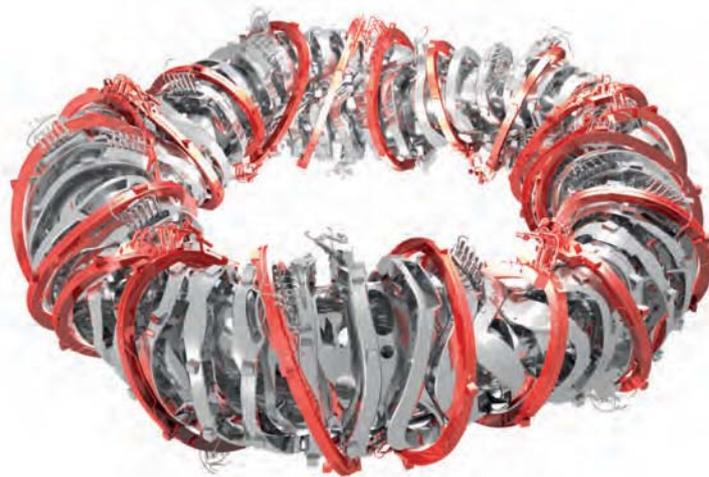
Die Erzeugung eines einschließenden Magnetfelds nur mit Magnetfeldspulen, die sich außerhalb des Plasmas befinden, hat jedoch auch Nachteile. Die Magnetfeldanordnung eines Tokamaks ist toroidal symmetrisch. Im Stellarator kann diese Symmetrie nicht aufrechterhalten werden. Folgt man einer Magnetfeldlinie in einem Stellarator, so ist die Magnetfeldstärke viel stärker moduliert als in einem Tokamak. Die in den so entstehenden Magnetfeldminima lokal gefangenen Plasmateilchen führen im Allgemeinen zu deutlich höheren Plasmaverlusten und verschlechtern somit vor allem bei hohen Plasmatemperaturen die Einschlusseigenschaften, wie man sie in einem brennenden Fusionsplasma erreichen muss. Erst mit der Einführung von Quasi-Symmetrien konnte dieser Nachteil des klassischen Stellarators größtenteils überwunden werden [5, 6]. W7-X beruht auf einer sogenannten quasi-isodynamischen Konfiguration [7], in der sowohl der Einschluss der schnellen Ionen [8, 9] als auch der des thermischen Plasmas verbessert ist [10]. In einem brennenden Deuterium-Tritium-Plasma müssen die 3.5 MeV Heliumionen ihre Energie an das etwa 20 keV heiße thermische Plasma übertragen, bevor sie den Einschlussbereich verlassen. W7-X ist nicht für ein brennendes Fusionsplasma ausgelegt und wird nur mit Wasserstoff oder Deuterium betrieben werden. Um den Einschluss schneller Ionen in W7-X zu testen, genügt es jedoch, Ionen zu erzeugen, die ein Verhältnis von Gyroradius zu kleinem Plasmaradius, ρ/a , aufweisen, wie es für die Heliumionen in einem späteren Fusionskraftwerk zu erwarten ist [9]. In W7-X beträgt die entsprechende Energie von Deuteriumionen etwa 60 keV.

Konzeptionell eröffnet die Stellaratoroptimierung Möglichkeiten, durch geeignetes Design der Magnetfeldspulen einen entscheidend verbesserten Plasmaeinschluss und -betrieb zu erreichen. Der Erfolg von W7-X wird daran bemessen werden, inwieweit dieses Konzept experimentell umgesetzt werden kann.

W7-X besteht aus 70 supraleitenden Spulen, die ein mittleres Magnetfeld auf der Achse des Torus von bis zu 3 T erzeugen können. 50 nicht-planare Spulen erzeugen die poloidalen und toroidalen Komponenten des einschließenden Magnetfelds. 20 planare Spulen sind so angeordnet, dass sie sowohl vertikale als auch toriodale Feldkomponenten erzeugen können. Mit der vertikalen Feldkomponente kann die radiale Position des Plasmas geändert werden, mit der toroidalen Komponente die helikale Verschraubung der Magnetfeldlinien (Rotationstransformation). Verschiedene Gruppen normalleitender Sattelspulen dienen der besseren Verteilung der Wärmelast auf den Wärmetauschern des Divertors und der Korrektur von Magnetfeldfehlern der supraleitenden Spulen. Abbildung 1a zeigt die Spulenanordnung von W7-X. In Abbildung 1b ist der Aufbau von W7-X im Jahr 2011 zu sehen. Innerhalb der Spulen befindet sich das Plasmagefäß. Die Spulen sind von einem Kryostat-Gefäß umgeben. Zusammen bilden sie das Kryovakuum, welches dazu dient, die Spulen auf kryogene Temperaturen (4 K) abkühlen zu können. 254 Stützen stellen die Verbindung zwischen Plasmagefäß und der Umgebung her. Die Stützen dienen als Zugang zum Kryostat-Gefäß

oder als Durchführungen durch das Kryovakuum. Die Durchführungen werden für das Abpumpen des Plasmagefäßes, die Kühlung der Komponenten im Plasmagefäß, die Erzeugung und Heizung des Plasmas und die Beobachtung des Plasmas mit Hilfe zahlreicher Diagnostiken benötigt.

a)



b)

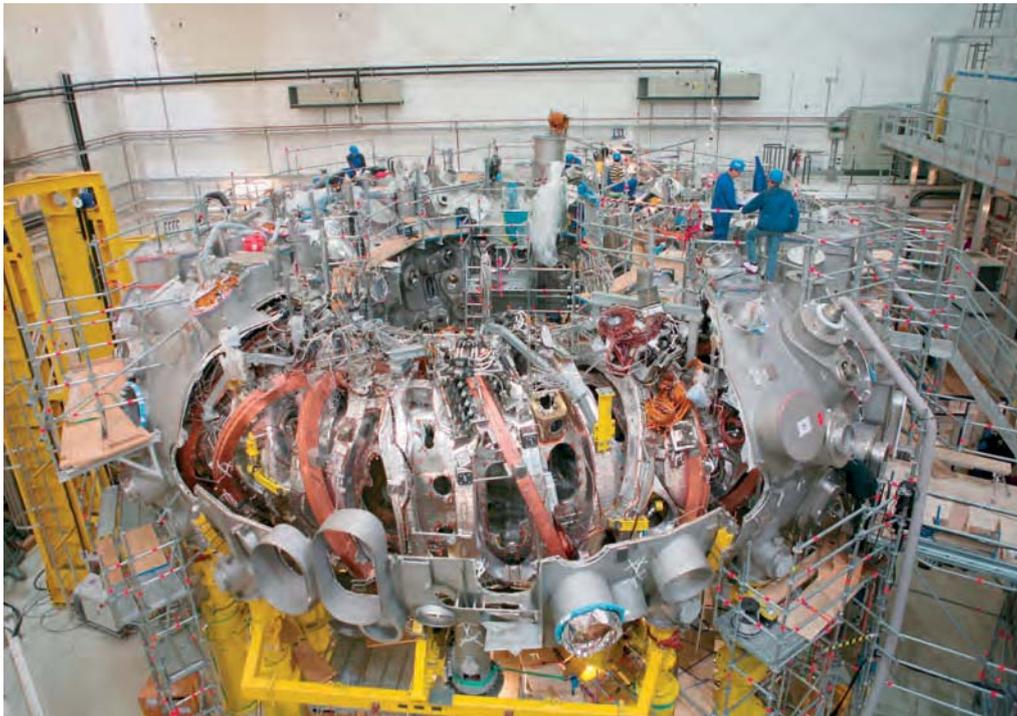


Abbildung 1: (a) Technische Zeichnung der W7-X Spulenordnung mit nicht-planaren Spulen und planaren Spulen (kupferfarbig). Innerhalb der Spulen ist das Plasmagefäß zu erkennen. (b): W7-X während der Bauphase (Stand 2011). Zu erkennen ist das Kryostat-Gefäß, welches die Spulen umgibt und das dazu dient, ein Vakuum zu erzeugen, damit die Spulen auf kryogene Temperaturen abgekühlt werden können. Im Vordergrund ist die obere Hälfte des Kryostat-Gefäßes noch nicht montiert.

Die Hauptaufgabe von W7-X ist es, Plasmen mit den für ein Fusionskraftwerk relevanten Temperaturen (einige keV) und Dichten (einige 10^{20} m^{-3}) zu erzeugen und diese stationär (bis zu 30 Minuten) aufrecht zu erhalten. Dazu muss die Plasmastabilität bei kraftwerksrelevanten Drücken (entsprechend einem mittleren Plasma- β von bis zu 5 %) und die stationäre Leistungsabfuhr bei etwa 10 MW gewährleistet sein. Für die stationäre Wärme- und Teilchenabfuhr sind magnetische Inseln am Plasmarand vorgesehen [11]. Da dieser sogenannte Insel-Divertor eine Magnetfeldkonfiguration verlangt, die sich mit ansteigendem Plasma- β (Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfeldruck) nur wenig ändert, wurde W7-X auch so optimiert, dass interne Plasmaströme möglichst klein gehalten werden. Um den Dauerbetrieb umzusetzen, wurde für die Erzeugung und Heizung des Plasmas eine stationäre Mikrowellenheizung entwickelt, die die Heizleistung resonant bei der Gyrofrequenz der Elektronen in das Plasma einkoppelt (bei 140 GHz entsprechend der 2. Harmonischen der Gyrofrequenz bei einem Magnetfeld von 2.5 T) [12]. Über Stöße geben die Elektronen Energie an die Ionen weiter. Schnelle Ionen mit Energien oberhalb der thermischen Energie des Plasmas können mit Hilfe einer Neutralteilcheninjektion [13] oder einer Radiofrequenzheizung [14] erzeugt werden. Diese Heizungssysteme sind jedoch nur für den gepulsten Einsatz (≈ 10 Sekunden) ausgelegt. Für die Messung der Plasmaeigenschaften werden zahlreiche Diagnostiken an W7-X installiert [15,16].

Inbetriebnahme der Anlage W7-X

Der Aufbau wesentlicher Komponenten von W7-X [1] wurde 2014 abgeschlossen. Danach begann die Inbetriebnahme der Anlagenkomponenten [17, 18]:

(A) Zunächst musste das Kryostat-Gefäß, in dem sich unter anderem die supraleitenden Spulen, deren Tragstruktur und die supraleitenden Verbindungen der verschiedenen Spulenstromkreise sowie die Versorgungsleitungen für das flüssige Helium befinden, abgepumpt werden. Während der ersten Abpumpphase (siehe Abbildung 2) wurden mehrere Druck-Plateaus eingestellt, um die Gefäßdeformationen zu vermessen. Nachdem 30 Vakuumlecks repariert wurden, stellte sich ein Druck unter 5×10^{-5} mbar ein.

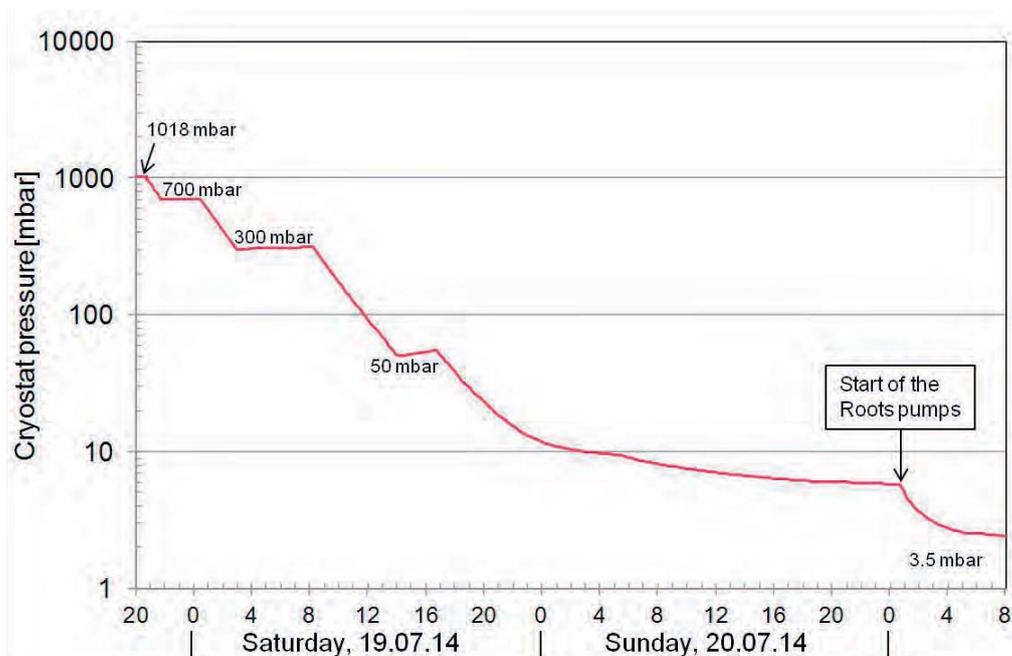


Abb. 2: Zeitlicher Druckverlauf im W7-X Kryostat-Gefäß während der ersten Abpumpphase. Die Plateaus dienten der Vermessung der Gefäßverformungen.

(B) Nach Erreichen eines Druckbereichs von einigen 10^{-5} mbar konnte mit dem Abkühlen des supraleitenden Magnetsystems begonnen werden. Zunächst wurden die Heliumleitungen zur Reinigung mit reinem Helium gespült. Danach wurde die Kryoanlage angefahren und das Helium langsam mit einer Rate von anfangs 0.5 K/Stunde abgekühlt. Um unzulässige thermische Spannungen zu vermeiden, wurde darauf geachtet, dass die Temperaturdifferenzen im Kryostat-Gefäß 40 K nicht überschreiten. Der Abkühlverlauf ist in Abbildung 3 zu sehen. Nach drei Wochen erreichten die gekühlten Strukturen mit einer Gesamtmasse von 425 t eine Temperatur von 20 K. Die weitere Abkühlung auf die Betriebstemperatur der Spulen von 4 K erfolgte innerhalb weniger Stunden. Da Spulen und Tragstrukturen bei den niedrigen Temperaturen wie Kryopumpen wirken, senkte sich der Druck auf $\sim 10^{-7}$ mbar ab. Anschließend wurden verschiedene Operationsmodi der Kryoversorgung eingestellt und getestet, insbesondere mussten die Heliumflüsse in verschiedenen Kühlkreisen eingestellt und die Energiebilanzen aufgestellt werden.

(C) Zunächst wurden die Stromkreise der supraleitenden Spulen einzeln in Betrieb genommen. Nachdem die Funktionsfähigkeit der insgesamt sieben Stromkreise inklusive aller supraleitenden Verbindungen (Joints), der Stromzuführungen und des Quench-Detektionssystems erfolgreich getestet wurden, konnte der gesamte Spulenverbund zum ersten Mal hochgefahren werden. Während wegen der auftretenden Kräfte bei der Inbetriebnahme der einzelnen Stromkreise die maximalen Ströme noch unterhalb der Werte für das Gesamtsystem lagen, wurden beim integralen Test aller Spulen Ströme von 12 kA in den nicht-planaren Spulen und 10 kA in den planaren Spulen erreicht. Diese Werte entsprechen einem Magnetfeld von 2.5 T auf der Achse des Torus. Damit steht das Spulensystem von W7-X für den ersten Plasmabetrieb bereit. Abschließend wurden mithilfe von Elektronen, die sich entlang der Magnetfeldlinien bewegen, die Magnetfeldtopologie bzw. die magnetischen Flussflächen vermessen [19]. Geschlossene Flussflächen, wie sie für den Einschluss eines Hochtemperaturplasmas notwendig sind, konnten damit nachgewiesen werden.

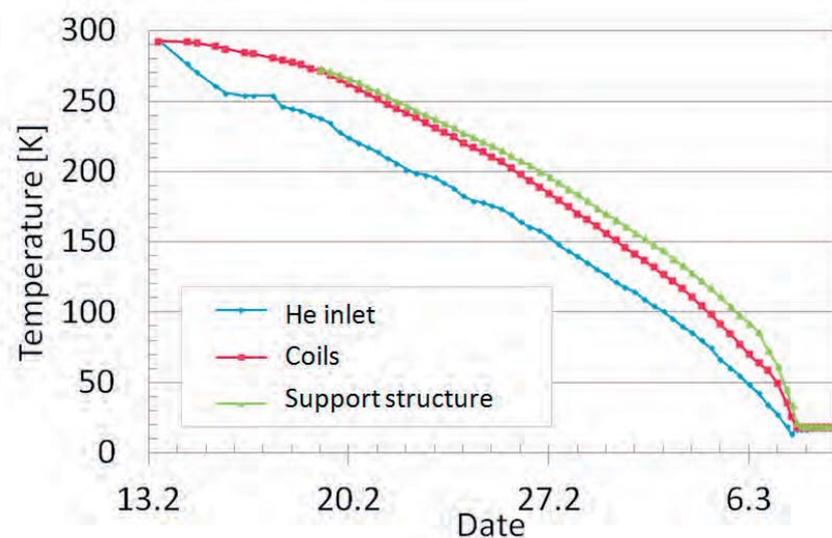


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der Abkühlung des W7-X Kryostaten. Gezeigt sind die Helium-Einlasstemperatur, die Temperatur der Spulen und die der Tragstruktur.

(D) Nach Fertigstellung der Montagearbeiten im Plasmagefäß, konnte mit dem Abpumpen des Plasmagefäßes begonnen werden. Da die Außenwand des Plasmagefäßes gleichzeitig die Innenwand des Kryostat-Gefäßes darstellt, war diese mit dem Abpumpen des Kryostaten

bereits auf Undichtigkeiten getestet worden. Somit richtete sich die Untersuchung der Dichtigkeit des Plasmagefäßes auf die Deckel der Stützen mit ihren vielfältigen Durchführungen für Wasserleitungen, Diagnostiken und Plasmaheizsystemen. Größere Lecks wurden an den Flanschen der Stützen für die Anschlüsse der Vakuumpumpen gefunden. Nachdem diese repariert waren und noch einige kleinere Vakuumlecks beseitigt wurden, konnte ein mehrtägiges Ausheizen des Gefäßes bei 150°C durchgeführt werden, um das auf den Oberflächen verbleibende Wasser zu reduzieren. Nach dem Ausheizen liegt der Vakuumdruck bei 3×10^{-7} mbar. Dieser Wert reicht zwar aus, um erste Plasmaexperimente durchzuführen, aber die Lecksuche und -reparatur wird fortgeführt.

(E) Die Mikrowellenheizung für die Erzeugung und Heizung des Plasmas [12] und die Diagnostiken, die für den ersten Plasmabetrieb notwendig sind, sind weitestgehend betriebsbereit. Bis zu zehn Mikrowellenröhren (Gyrotrons) stellen bei einer Frequenz von 140 GHz (entsprechend der zweiten Harmonischen der Elektronen-Resonanzfrequenz bei 2.5 T) etwa 9 MW Heizleistung zur Verfügung. Abbildende Spiegel sorgen für die Übertragung der Mikrowellen von den Röhren bis in das Plasmagefäß von W7-X (siehe Abbildung 4). Die Verluste der Mikrowellenübertragung durch die Luft betragen nur wenige Prozent.

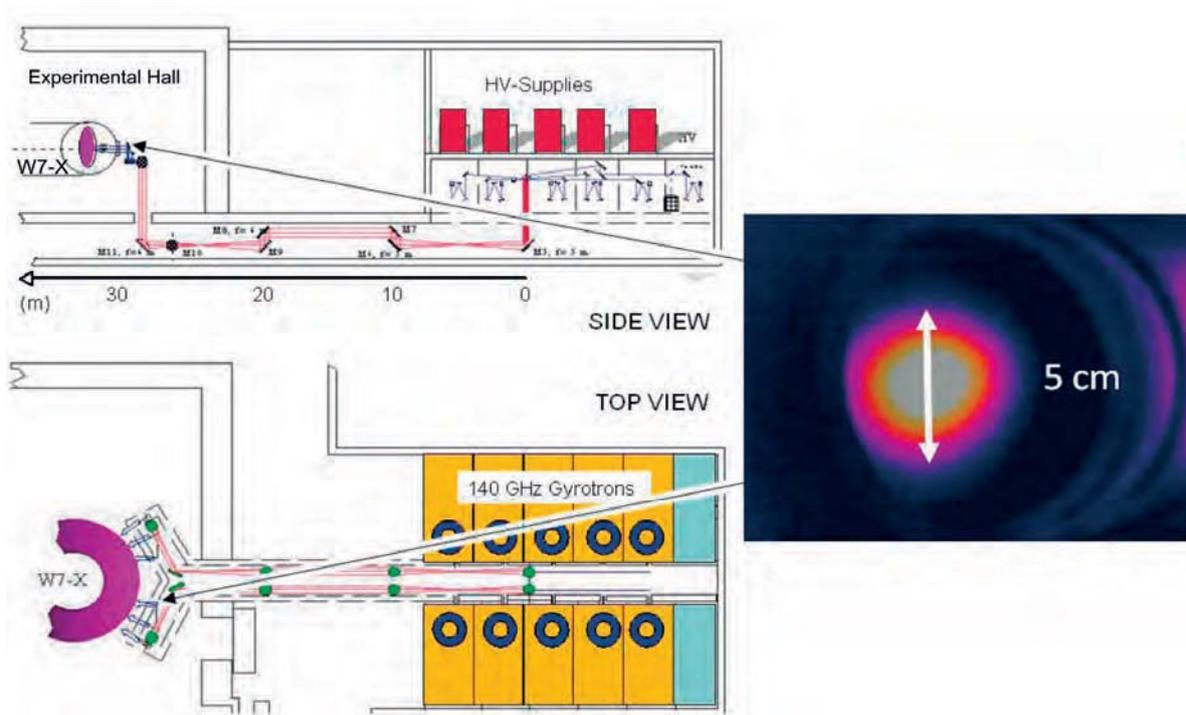


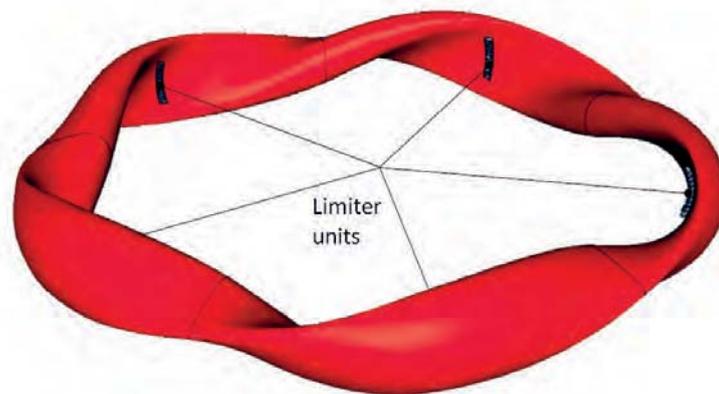
Abb. 4: Die Mikrowellenheizung von W7-X besteht aus 10 Mikrowellenröhren (Gyrotrons). Mithilfe eines Spiegelsystems wird die Leistung der Röhren quasi-optisch bis zum Plasma-Gefäß von W7-X übertragen (linkes Bild). Das rechte Bild zeigt das Temperaturbild eines ~ 1 MW Mikrowellenstrahls auf einem der Vakuumfenster von W7-X. Die Farbskala von blau bis weiß entspricht der Temperaturerhöhung gegenüber der Raumtemperatur (weiß: maximale Temperaturerhöhung). Die Farben auf der rechten Seite des Bildes stellen Reflektionen der Infrarotstrahlung an der Einfassung des Fensters dar. Vakuumfenster aus Diamant bilden einen verlustarmen Übergang von der Übertragung durch die Luft in das Plasmagefäß. Für die Erzeugung des ersten W7-X Plasmas stehen sechs Mikrowellenröhren mit einer Gesamtleistung von 5 MW bereit.

Wissenschaftliches Programm und Extrapolation zu einem Fusionskraftwerk

Erste Plasmaexperimente an W7-X sind in der zweiten Jahreshälfte 2015 geplant. Die schrittweise Komplettierung der Anlage sieht vor, 2020 erste Untersuchungen mit stationären Hochleistungsplasmen durchzuführen. Das wissenschaftliche Programm von W7-X bis 2020 teilt sich in dedizierte Betriebsphasen auf [20]:

(A) Die erste Betriebsphase in 2015/2016 mit einer Dauer von 13 Wochen dient vor allem der Erzeugung und Aufrechterhaltung erster Plasmen und der Inbetriebnahme wichtiger Diagnostiken. Da die zugeführte Heizleistung lediglich über sogenannte Limiter mit einem begrenzten Plasma-Wandkontakt abgeführt werden muss, ist die Plasmadauer bei 1 MW Heizleistung zunächst auf etwa 1 s begrenzt (siehe Abbildung 5). Die Limiter sind nicht aktiv gekühlt und können kurzfristig hohe Wärmeflüsse nur dadurch aufnehmen, indem sie sich adiabatisch erwärmen. Zusätzlich sollen erste physikalische Studien zum Einschlussverhalten des Plasmas, zum Transport in der Plasmarandschicht und zur Dichtekontrolle des Plasmas durchgeführt werden [21].

(a)



(b)

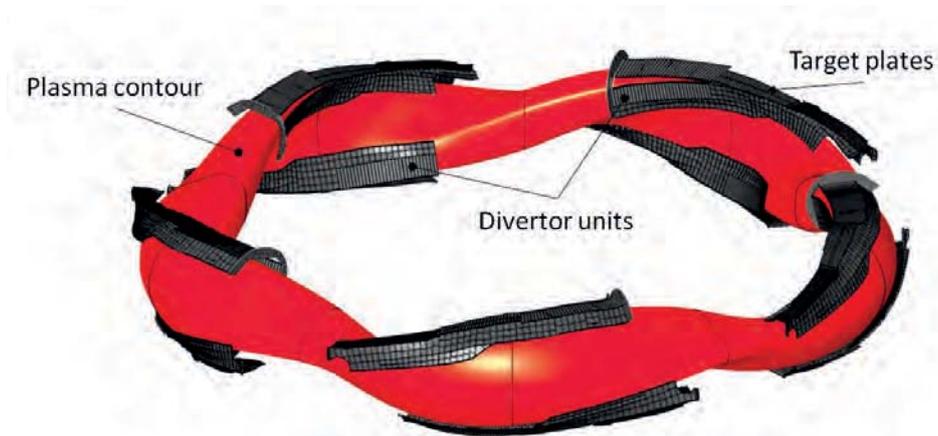


Abb. 5a) Plasmaoberfläche (rot) von W7-X mit den fünf Limitern, die auf der Innenseite des Plasmas liegen. 5b) zeigt die zukünftige Divertor-Anordnung.

(B) Für die zweite Betriebsphase mit einer Dauer von 60 Wochen werden die Limiter gegen sogenannte Divertoren ausgetauscht. Diese Umbauphase wird etwa neun Monate dauern. Die

Targetplatten der Divertoren schneiden die magnetischen Inseln am Plasmarand und erzeugen somit offene Magnetfeldlinien, über die das Plasma vom Einschlussgebiet auf die Targetplatten abfließen kann. Dieser erste Divertor wird zwar auch noch nicht aktiv gekühlt sein. Allerdings ermöglicht die größere Wärmekapazität bzw. die Verteilung der Wärmelast auf größere Flächen bei 8 MW Heizleistung bereits Plasmadauern von 10 s. Das Hauptziel dieser Betriebsphase ist die Vorbereitung des stationären Betriebs mit einer Magnetfeldkonfiguration, die bereits der späteren Anordnung für den stationären Betrieb entspricht. In der zweiten Betriebsphase sollen auch weitere Heizsysteme (Neutralteilchen-Heizung, Radiofrequenz-Heizung) in Betrieb genommen werden.

(C) Für die dann folgenden Betriebsphasen werden alle Targetplatten des Divertors durch wassergekühlte Elemente ersetzt, die für stationäre Wärmeflüsse bis 10 MW/m^2 ausgelegt sind. Zusammen mit der Komplettierung der Kühlkreisläufe ist W7-X dann in der Lage, stationäre Plasmen mit einer Heizleistung von 10 MW über 30 Minuten zu betreiben. Gleichzeitig sollen kraftwerksrelevante Temperaturen und Dichten zusammen mit hinreichend guten Einschlusseigenschaften und einer kontrollierten Teilchen- und Wärmeabfuhr (mit Hilfe des Divertors) erreicht werden.

Studien, die sich mit der Extrapolation zu einem Stellarator-Kraftwerk beschäftigen, zeigen, dass ein W7-X entsprechendes Fusionskraftwerk in den linearen Dimensionen etwa vier Mal größer sein muss [22, 23]. Die Größe ist bestimmt durch die Einschlusseigenschaften und die erforderliche Dicke des Blankets. Der magnetische Einschluss muss so gut sein, dass ein selbständig brennendes Fusionsplasma aufrecht erhalten werden kann. Im Blanket, das sich zwischen Plasma und Spulen befindet, wird aus Lithium und den aus der Fusionsreaktion stammenden Neutronen, Tritium erbrütet. Das Magnetfeld eines solchen Kraftwerks wäre etwa doppelt so stark wie das von W7-X. Der normierte Plasmadruck (Plasma- β) müsste gegenüber W7-X nicht weiter erhöht werden. Erste Analysen zeigen, dass der Aufwand, ein solches Stellarator-Kraftwerk zu bauen, etwa vergleichbar ist mit dem Aufwand für ein entsprechendes Tokamak-Kraftwerk [24]. Da das Magnetfeld eines Stellarators intrinsisch stationär ist, erwartet man, dass die rezirkulierende Leistung, die benötigt wird, das Kraftwerk selbst zu betreiben, niedriger ist als in einem Tokamak.

Zusammenfassung

Im letzten Jahr wurde die Montage der wesentlichen Komponenten von W7-X abgeschlossen. Seither wurden wichtigsten Ziele der Inbetriebsetzung von W7-X bereits erreicht. Insbesondere konnte das für die erste Betriebsphase erforderliche Magnetfeld erzeugt und die Magnetfeldstruktur erfolgreich vermessen werden. In der zweiten Jahreshälfte von 2015 sollen erste Plasmen erzeugt werden. In den nächsten Jahren erfolgt die weitere Komplettierung der Anlage, so dass 2020 mit dem stationären Plasmabetrieb begonnen werden kann. Ziel von W7-X ist, die grundsätzliche Eignung des Konzepts für ein Fusionskraftwerk zu zeigen und damit eine Alternative zum Tokamak-Konzept zu schaffen. Die europäische Forschungsstrategie [25] sieht vor, beide Konzepte, Stellarator und Tokamak, parallel zu verfolgen, da über die optimale Auslegung zukünftiger kommerzieller Kraftwerke noch nicht entschieden werden kann.

Acknowledgement

This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium and has received funding from the EURATOM research and training programme 2014-2018 under grant agreement No 633053. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.

Referenzen

- [1] H.-S. Bosch et al., Nucl. Fusion 53 (2013) 126001
- [2] D. J. Campbell, Phys. Plasmas 8 (2001) 2041
- [3] G. Grieger et al., Phys. Fluids B4 (1992) 2081
- [4] P. Helander et al., Plasma Phys. Control. Fusion 54 (2012) 124009
- [5] J. Nührenberg, R. Zille, Phys. Lett. A 129 (1988) 113
- [6] A. H. Boozer, Plasma Phys. Control. Fusion 37 (1995) A103
- [7] J. Nührenberg, Plasma Phys. Control. Fusion 52 (2010) 124003
- [8] W. Lotz et al., Plasma Phys. Control. Fusion 34 (1992) 1037,
- [9] M. Drevlak et al., Nucl. Fusion 54 (2014) 073002
- [10] C. D. Beidler et al., Nucl. Fusion 51 (2011) 076001
- [11] H. Renner et al., Nucl. Fusion 40 (2000) 1083
- [12] V. Erckmann et al., Fusion Sci. Technol. 52 (2007) 291
- [13] P. McNeely et al., Fusion Eng. Design 88 (2013) 1034
- [14] J. Ongena et al., Phys. Plasmas 21 (2014) 061514
- [15] R. König et al., Rev. Sci. Instrum. 83 (2012) 10D730
- [16] R. König et al., J. Inst. (2015) zur Veröffentlichung angenommen
- [17] H.-S. Bosch et al., Fusion Engineering Design (2015) im Druck
- [18] F. Schauer et al., Proceedings 26th Symposium on Fusion Engineering (2015) SX4-2
- [19] Pressemitteilung www.ipp.mpg.de/de/aktuelles/presse/pi/2015/07_15
- [20] R. C. Wolf et al., eingereicht bei IEEE Transactions on Plasma Science (2015)
- [21] T. Sunn Pedersen et al., eingereicht bei Nucl. Fusion (2015)
- [22] C. D. Beidler et al., Nucl. Fusion 41 (2001) 1759
- [23] R. C. Wolf et al., Fusion Eng. Design 83 (2008) 990
- [24] F. Warmer et al., Fusion Eng. Design 91 (2015) 60
- [25] www.euro-fusion.org/eurofusion/the-road-to-fusion-electricity/

Prof. Dr. Robert C. Wolf und das W7-X-Team
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Wendelsteinstraße 1
D-17491 Greifswald

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2015 -Berlin:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2015-AKE_Berlin/Links_DPG2015.htm

Zur Sammlung der Tagungsbände des AKE auf dem DPG - Server:

<https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/ake-tagungsband.html>

Vorträge auf der Berliner DPG-Tagung (2015)

Herausgeber:
Arbeitskreis Energie (AKE) in der DPG
Prof. Dr. Hardo Bruhns
Meliesallee 5
40597 Düsseldorf
E-Mail: ake@bruhns.info

Die Grafik des Einbandes wurde
mit freundlicher Genehmigung der
Autoren unter Verwendung von
Abbildungen aus den Beiträgen von
H. Milsch, M. Waidhas und F.
Wagner gestaltet.

Energie

Erzeugung - Netze - Nutzung

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Berlin 2015

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, September 2015

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Berlin, 16. bis 18. März 2015

Haupt- und Fachvorträge

Inhaltsverzeichnis / Table of Contents

Introduction	7
Fachsitzungen / Sessions	8
Abstracts	9
Organic Photovoltaics: Status and Perspectives - presented by J. Widmer	28
Concepts for Cost Reduction in CSP Power Plants - presented by R. Pitz-Paal	42
Optionen und Trends der Biomassenutzung – Perspektiven für die Bioenergie 2050 - vorgetragen von J. Ponitka	53
Deep Geothermal Fluid Resources: Energetic Use and Beyond - presented by H. Milsch	63
Geological Carbon Storage: Processes, Risks and Opportunities - presented by H. Ott	77
„Fracking“ – Routine oder Risikotechnologie? - vorgetragen von M. Kosinowski	94
Power to Gas – an Economic Approach for Energy Storage? - presented by M. Waidhas	107
Nuclear Fission Energy: New Build, Operation, Fuel Cycle and Decommissioning in the International Perspective - presented by S. Nießen	113

Wendelstein 7-X – Ein Konzept für ein stationäres Fusionsplasma - vorgetragen von R. C. Wolf	122
Neue Materialien und Komponenten für energieeffiziente Gebäudehüllen - vorgetragen von U. Heinemann	131
Eigenschaften einer Stromversorgung mit intermittierenden Quellen - vorgetragen von F. Wagner	138
Transient Stability of Conventional Power Generating Stations during Times of High Wind Penetration - presented by M. Zarifakis	156
Ganzheitliche Bewertung von Energiesystemen - vorgetragen von R. Friedrich	168
Impressum	183

Der vorliegende Band versammelt schriftliche Ausarbeitungen von Vorträgen auf der Tagung des Arbeitskreises Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft des Jahres 2015 in den Räumen der Technischen Universität Berlin. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien der meisten Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort gelangt man zum Archiv des AKE) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.