

Wendelstein 7-X

NEWSLETTER

Nr. 10/ August 2014

Wendelstein 7-X auf dem Weg zum ersten Plasma

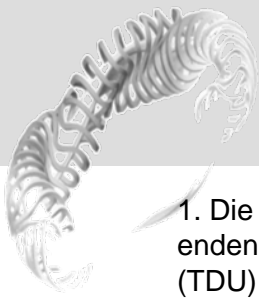
Nach über einem Jahrzehnt des Aufbaus von Wendelstein 7-X befindet sich das Experiment jetzt in der Betriebsvorbereitungsphase und nähert sich damit dem ersten Plasmabetrieb. Mit der Überarbeitung des Zeitplans 2007 waren der Start der Betriebsvorbereitung für 2014 und der erste Plasmabetrieb für 2015 vorgesehen. Der vollständige Ausbau der Anlage für den Langpulsbetrieb soll 2019 abgeschlossen sein. Dieser Zeitplan ist immer noch aktuell, was nicht bedeutet, dass in der Zwischenzeit keine großen Herausforderungen zu bewältigen waren. Eine der gegenwärtigen Hauptaufgaben ist der Einbau der dem Plasma zugewandten Hochleistungskomponenten (Wendelstein 7-X Newsletter

Nr. 9) sowie der Diagnostikkomponenten im Plasmagefäß, die zusammen mit den Hochleistungskomponenten eingebaut werden. Diese Einbauarbeiten dauern etwas länger als ursprünglich angenommen. Um im Zeitplan zu bleiben, wurden die Pläne für das erste Plasma angepasst:



Foto: IPP, Bernhard Ludewig

Abbildung 1. Das Foto zeigt die fast fertiggestellte Anlage in der Torushalle und die zunehmende Anzahl an Komponenten in der direkten Umgebung des Experiments



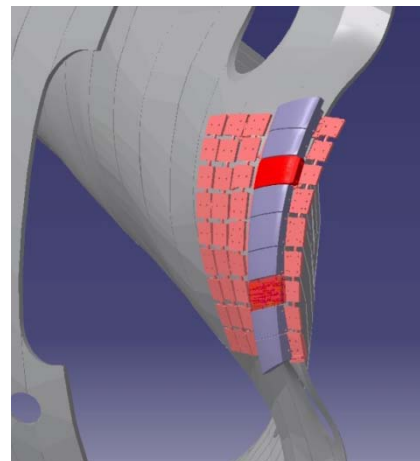
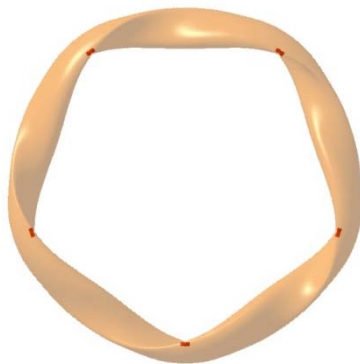
1. Die erste Plasmabetriebsphase (OP 1.1) wird 2015 beginnen und nach drei Monaten enden. Anstelle des früheren Plans, das erste Plasma mit Hilfe von zehn Testdivertoreinheiten (TDU) zu erzeugen, werden die ersten Plasmen nun mit fünf Grafitlimiterstreifen (sogenannten Limitern) begrenzt.

2. Der Ausbau des Limiters, der Einbau der Testdivertoreinheit und die Komplettierung der plasmaseitigen Komponenten schließen sich unmittelbar an und werden ungefähr ein Jahr in Anspruch nehmen.

3. Die Plasmabetriebsphase mit der Testdivertoreinheit (OP 1.2) wird 2016 beginnen.

Der Einbau des vollständig gekühlten High-Heat-Flux-Divertors für den Dauerbetrieb wird ungefähr zwei Jahre dauern. Daher beginnt 2019 die zweite große Kampagne für den Plasmabetrieb mit Plasmapulsen von 30 min (OP 2).

Der Einsatz von Inboard-Limitern spart viel Zeit auf dem Weg zum ersten Plasma und erlaubt zudem eine frühzeitige Betriebsvorbereitung der Hauptsysteme, die für den Plasmabetrieb benötigt werden: Kryostat, Kryokühlanlage, supraleitendes Magnetsystem, Elektron-Zyklotron-Resonanz-Heizung und die wichtigsten Diagnostiken.



IPP, Dirk Hartmann

Abbildung 2. Links: Die symmetrische Anordnung der fünf Limiterstreifen wird hier in der Draufsicht dargestellt. Rechts: eine CAD-Zeichnung eines Limiters wie er an den Wandschutzelementen installiert wird. Die rot dargestellten Kacheln können mit speziellen Sonden ausgestattet werden, um die Plasmarandparameter zu messen.

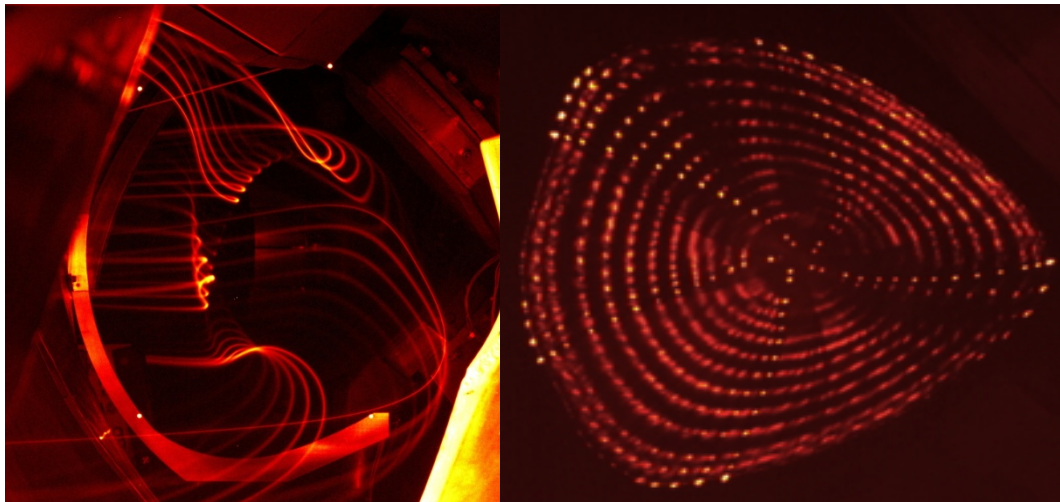
Die Limiter sind so ausgelegt, dass sie Plasmabetrieb mit bis zu 2 MJ der eingespeisten Energie pro Plasmapuls ermöglichen. Damit sollte man in der Lage sein, Plasmen für die Dauer von einer Sekunde zu erzeugen, die mit 2 MW ECRH geheizt werden. Diese Pulse sind lang genug, um ein spannendes Programm für den ersten Plasmabetrieb zu ermöglichen und damit viele wichtige Fragen zu beantworten. In der Betriebsphase OP1.2 sind mit dem Testdivertor Pulslängen von 10 Sekunden bei 8 MW ECRH vorgesehen. In OP 2 stehen dann Plasmen mit Pulslängen von bis zu 30 min bei vollständiger Wasserkühlung auf dem Plan und damit die tatsächliche Untersuchung des Dauerbetriebs.



Der Limiter besteht aus fünf identischen Reihen, die symmetrisch entlang des Torus mit seiner Fünffach-Symmetrie platziert werden. Jede Reihe besteht aus neun hochtemperaturresistenten Graphitkacheln, die den starken Wärmefluss vom Plasma aufnehmen sollen. Die sorgfältige 3-D-Bearbeitung der Limiteroberfläche sorgt dafür, dass der hohe Wärmefluss so gleichmäßig wie möglich über die gesamte Limiterfläche verteilt wird.

Ein grundlegendes und trotzdem nicht triviales Ziel von OP 1.1 besteht darin, wiederholt Plasmen mit Elektronentemperaturen von weit über 10 Millionen Grad Celsius (ungefähr 1 keV) zu erzeugen. Wenn keine größeren Probleme auf dem Weg zu diesen ersten Plasmen auftreten, kann auch noch weit mehr erreicht werden.

Im Folgenden werden an einigen Beispielen interessante physikalische Fragestellungen vorgestellt, die man bereits in OP 1.1 untersuchen kann.



Fotos: IPP, Matthias Otte

Abbildung 3. Das Feldlinienvermessung stammt vom W7-X-Vorgängerexperiment W7-AS. Links werden individuelle Feldlinien mit einem Elektronenstrahl unter Verwendung von Hintergrundgas visualisiert. Rechts wurden die ineinander verschachtelten magnetischen Flussflächen mit einem Elektronenstrahl und einem phosphoreszierenden Stab (nicht sichtbar) gemessen.

Die Magnetfeldqualität am W7-X, insbesondere das Vorhandensein von ineinander verschachtelten magnetischen Flächen, ist besonders wichtig für das Erreichen eines guten Plasmaeinschlusses. Die Magnetfeldqualität kann exakt gemessen und bereits vor dem Erzeugen des ersten Plasmas überprüft werden. Ein Elektronenstrahl, der entlang des Magnetfeldes injiziert wird, wird den Magnetfeldlinien ziemlich genau folgen und daher die Form der Magnetflächen detailliert nachzeichnen. Kleine Störfelder, die während der Flussflächenvermessung mit dem Elektronenstrahl entdeckt werden, können mithilfe von fünf Trimmspulen korrigiert werden. Diese Trimmspulen wurden im Rahmen einer Kollaboration mit den Vereinigten Staaten (siehe Newsletter Nr. 9) zur Verfügung gestellt.

Sobald die magnetische Topologie überprüft ist und die Magnetfeldstärke von 2,5 Tesla und ein Hochqualitätsvakuum für den Betrieb erreicht sind, kann der Plasmabetrieb beginnen. Die Plasmen können durch Injektion von Mikrowellen bei einer Frequenz von 140 GHz erzeugt werden. Diese Resonanzfrequenz entspricht der Frequenz, mit der die Elektronen um die Magnetfeldlinien rotieren. Die Mikrowellen heizen die Elektronen soweit auf, dass die neutralen Atome ionisiert werden und schließlich aus dem neutralen Gas ein Plasma entsteht.



Die ersten W7-X-Plasmen werden Helium-Plasmen sein. Solche Plasmen sind relativ einfach zu erzeugen und zu kontrollieren und sollen zudem dazu dienen, die Wände der Maschine effizient zu konditionieren. Außerdem soll untersucht werden, wie ECRH-erzeugte Plasmen die Konditionierung und Reinigung des Plasmagefäßes unterstützen.

Da die Plasmen in der späteren Betriebsphase OP 1.2 aus Wasserstoff erzeugt werden, sind am Ende von OP 1.1 bereits Experimente mit Wasserstoffplasmen vorgesehen.

Die ersten Plasmen werden eine relativ geringe Dichte ($1 \text{ bis } 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$) aufweisen. Zu Beginn werden die Pulse mit 0,1 Sekunde relativ kurz sein. Mit fortschreitender Betriebserfahrung kann man sie dann auf einige Sekunden verlängern. Die Kombination von geringer Dichte und Elektronenheizung wird dazu führen, dass die Elektronentemperatur (~ 35 Millionen K) bedeutend höher sein wird als die Ionentemperatur (~ 10 Millionen K).

Aller Voraussicht nach werden die viel heißeren Elektronen anfangs mit einer höheren Rate verloren gehen als die Ionen. Daher wird das Plasma leicht positiv geladen sein. Das wiederum erhöht den Elektroneneinschluss und der Einschluss der Ionen wird bis zu einem Punkt reduziert, an dem sowohl Elektronen und Ionen mit gleicher Rate verloren gehen und sich ein Gleichgewicht (steady state) für den Ladungsgehalt einstellt. Dieses Gleichgewicht wird ein nach außen gerichtetes elektrisches Feld haben, das die Gesamtenergie verbessern sollte. Das elektrische Feld ändert außerdem die Umlaufbahnen der Teilchen und kann so neben der Verunreinigungsüberwachung zu einer allgemeinen Verstärkung des Plasmaeinschlusses führen. Sobald man längere Entladungen mit höheren Dichten erreicht, werden sich die Ionentemperaturen den Elektronentemperaturen angleichen und die zuvor beschriebene vorteilhafte Eigenschaft kann während einer solchen Entladung wieder verschwinden. Genau diese Phänomene können während der ersten Betriebsphase untersucht werden.

Zusammenfassung

Wendelstein 7-X nähert sich schnell dem ersten Plasmabetrieb. Die ersten Plasmen werden mit reduzierten Plasmagefäßeinbauten durchgeführt. Der wichtigste Unterschied ist die Verwendung eines Limiters anstelle eines Divertors. Eine erste Analyse zeigt, dass trotz reduzierter Anzahl von Plasmagefäßeinbauten ein aufregendes und relevantes Physikprogramm in dieser Phase durchgeführt werden kann.

Thomas Sunn Pedersen