

Wendelstein 7-X

NEWSLETTER

Nr. 15/Januar 2018

Erster Divertorbetrieb: höhere Plasmadichten, längere Entladungen

Kurz vor Weihnachten wurde – wie geplant – die Experimentkampagne von Wendelstein 7-X beendet. Nach dem Kampagnenstart Anfang September folgten fünfzehn Wochen Experimentbetrieb, wobei die wesentlichen Anlagenkomponenten fehlerfrei funktionierten. Die technische Zuverlässigkeit der Maschine erlaubte es, die zur Verfügung stehende Experimentzeit effektiv zu nutzen. Zum W7-X-Team gehörten ungefähr 150 wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die in Greifswald angestellt sind, und über 60 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den EUROfusion-Laboren, den USA, Japan und Australien.

Die Erwartungen an die Experimente waren hoch: Nach dem Ende der ersten Betriebskampagne im März 2016 war Wendelstein 7-X mit einer neuen Komponente für die kontrollierte Abfuhr von Energie und Teilchen aus dem Plasma – dem sogenannten Testdivertor – ausgestattet worden. Ein Divertor nimmt Wärmelasten an hoch-belastbaren Prallplatten (Targets) auf. Diese Targets schneiden Regionen im Außenbereich des Magnetfelds, den magnetischen Inseln. Daher spricht man bei W7-X auch von einem ‚Insel-Divertor‘ (siehe Abb. 1).

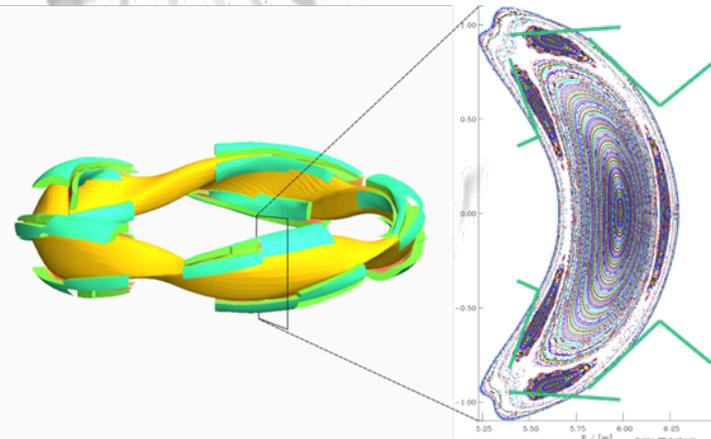


Abb. 1 Wendelstein 7-X Plasma (gelb) mit Divertoren (grün); Schnitt durch das Plasma mit magnetischen Inseln



Der Divertor wurde für die jetzt zu Ende gegangene und für die 2018 folgende Kampagne eingebaut. Er ist Teil einer Langzeitstrategie zu immer längeren Plasmaentladungen. Insgesamt wurden zehn Divertoreinheiten eingebaut, die ohne Wasserkühlung betrieben wurden. Dadurch war der Divertor unempfindlicher gegenüber unvorhergesehenen Belastungen und so ein ideales Instrument für erste Divertorstudien. Sehr lange Pulse werden jedoch erst mit Kühlung in einer späteren Betriebsphase möglich sein. Mit dem Einsatz des Testdivertors vermied man demzufolge technische Risiken, konnte aber bereits aussagekräftige physikalische Studien durchführen. Das Ziel der Divertor-Phase bestand also darin, erste Erfahrungen zu sammeln und einen sicheren und zuverlässigen Betrieb zu entwickeln. Damit wird die Grundlage geschaffen, die Entladungsdauer von derzeit Sekunden auf Minuten zu erhöhen.

Abbildung 2 stellt die Wärmelasten des Plasmas am Divertor dar. Die Abbildung zeigt Thermografiedaten, die den Ort dieser Lasten sichtbar machen. Alles in allem stieg die Oberflächentemperatur des Divertors nach einigen Sekunden Plasmaentladung auf bis zu 900 °C an, eine Temperatur, die der Testdivertor aus Grafit für kurze Zeit problemlos aushält. Eine erste Analyse zeigte, dass die beobachteten Divertor-Temperaturen mit den theoretischen Vorhersagen übereinstimmen. Nachdem schrittweise demonstriert wurde, dass die Wärmelasten handhabbar sind, wurden zum Ende der Kampagne routinemäßig längere Entladungen von bis zu 30 s durchgeführt. Bei diesen längeren Entladungen konnten bis zu 75 MJ Heizenergie in den Wendelstein 7-X eingebracht werden – 18 Mal mehr als in der ersten Betriebskampagne.

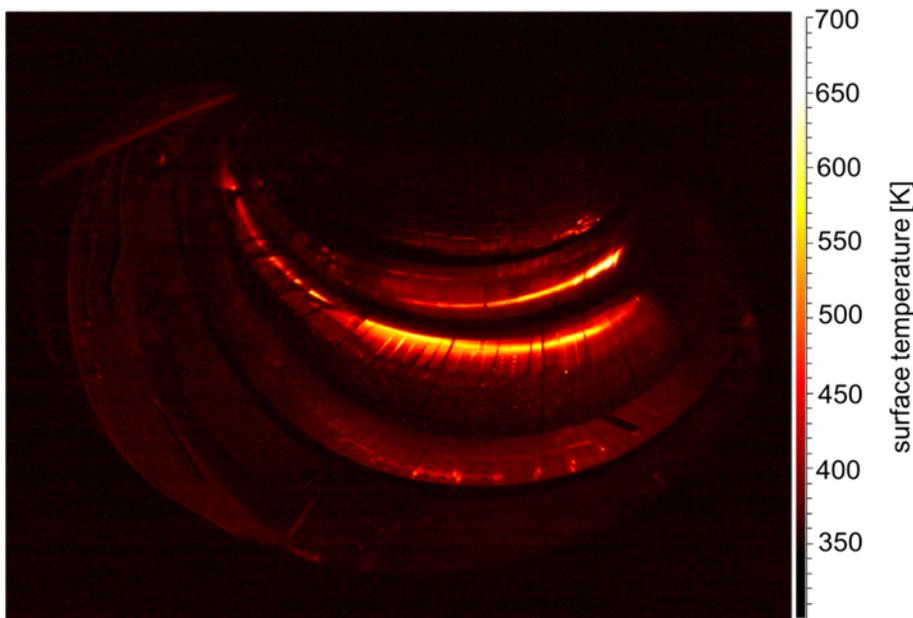


Abbildung 2 Infrarot-Bild an einer von zehn Divertoreinheiten während einer Plasmaentladung. Die zwei gelben, hellen Linien zeigen die Bereiche der intensivsten Wärmelast. Diese Bereiche – die sogenannten „strike lines“ - sind nur wenige Zentimeter breit. In diesem Beispiel wurde einige Sekunden nach dem Start der Plasmaentladung eine Temperatur von mehr als 400 °C erreicht.



Für die schrittweise Erhöhung der Heizleistung und Verlängerung der Plasmaentladungen musste man geringfügige Abweichungen vom idealen Magnetfeld beseitigen. Diese Abweichungen, die sich aus kleinen Ungenauigkeiten bei der Fertigung der supraleitenden Wendelstein 7-X-Spulen ergaben, führten zu asymmetrischen Wärmelasten, konnten aber mit Hilfe von Trimmspulen korrigiert werden. Mit dem Einsatz der Trimmspulen wurde die Wärmebelastung gleichmäßig auf alle Divertoreinheiten verteilt, was durch Infrarot-Messungen bestätigt wurde.

Gleichmäßige Wärmelasten ermöglichen es, die Heizenergie zu erhöhen. Und auch die Heizleistung konnte entsprechend erhöht werden – eine wichtige Voraussetzung für eine hohe Plasmadichte. Schließlich wurden im Plasmazentrum Dichten von bis zu $1,4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ erzeugt – ein Zielwert, der für die Funktionsweise von W7-X von großer Bedeutung ist und mehr als das Vierfache im Vergleich zur vorherigen Kampagne betrug. Zwei wichtige Entwicklungen ermöglichten dieses Ergebnis:

1. Für die effiziente Versorgung des Wendelstein 7-X-Plasmas mit Brennstoff wurden kleine gefrorene Wasserstoffpellets in das Plasma injiziert (siehe Abb. 3). Wenn die Pellets sich durch das Plasma bewegen, verdampfen sie, die Teilchen werden schließlich ionisiert und versorgen so das Plasma mit neuem Brennstoff.
2. Beim Starten einer Plasmaentladung sind die Dichten noch niedrig. Für hohe Dichten ist es jedoch notwendig, ein anderes Heizschema einzusetzen. Eine spezielle Polarisation der Mikrowellenstrahlen ermöglicht das Eindringen oberhalb von Dichtewerten, bei denen die Strahlen sonst reflektiert werden würden. Die Polarisation der Mikrowellenstrahlen wird während der ersten zwei Sekunden der Entladung im Aufbau des Plasmas geändert, wenn die Dichten noch niedriger sind. Mit diesem Heizschema wurden Plasmen mit ausgezeichnetem Energieeinschluss und hohen Ionentemperaturen erzeugt.



Abb. 3 Blick in das Plasmagefäß von Wendelstein 7-X während der Pelletinjektion. Im unteren mittleren Bereich sieht man die Kacheln zum Schutz der Gefäßwand, die durch das sichtbare Plasmalicht (unscharfe Bereiche) beleuchtet werden. Die Pelletspur ist mit einem Pfeil gekennzeichnet.



Mit diesen Voraussetzungen ergab sich eine Möglichkeit, den Divertor bei Vollastbedingungen zu betreiben. Dabei handelte es sich um das sogenannte „Diverter-Detachment“, bei dem die Divertor-Targetplatten so isoliert werden, dass höhere Wärmeflüsse die Targetplatten nicht erreichen können. Stattdessen wird die Plasmaenergie gleichmäßig abgestrahlt und lokale Spitzenbelastungen werden begrenzt. Das Divertor-Detachment ist eine Voraussetzung für zukünftige Fusionskraftwerke, da dadurch die Wärmebelastungen auf der Divertoroberfläche erheblich reduziert werden. Während der zurückliegenden Kampagne wurde für einige Sekunden ein stabiles und komplettes Detachment erreicht. Die Leistungseinträge auf alle zehn Divertoreinheiten konnte so um den Faktor 10 reduziert werden.

Der Betrieb bei hoher Dichte eröffnete weitere neue Möglichkeiten für physikalische Studien. So konnten entscheidende Gesichtspunkte der Stellaratoroptimierung untersucht werden. Dazu gehörte die Kontrolle der internen Plasmaströme während der langen Plasmaentladungen. Außerdem wurde der für den Stellarator spezifische Wärmetransport erstmals für ein optimiertes Plasma mit gleichzeitig heißen Ionen und Elektronen untersucht. Mit neuen und erweiterten Messsystemen waren erste spannende Einsichten in die Plasmaturbulenz und den Transport von Verunreinigungen möglich. Bei allen durchgeführten Experimenten wurden auch die Magnetfeldkonfigurationen variiert, um diese zentrale Größe für den Plasmatransport und für die Stabilitätseigenschaften des Plasmas zu analysieren.

Die Experimentkampagne 2017 war insgesamt sehr erfolgreich. Die Zeit bis zum Sommer 2018 wird nun für weitere Ausbauten und die Inbetriebnahme neuer Anlagen benötigt. Dazu gehören neue Plasmadiagnostiken, ein spezielles Divertorelement (das sogenannte Scrapelement) sowie neue Heizsysteme. Der gegenwärtige Plan sieht die Wiederaufnahme des Plasmabetriebs im Juli 2018 vor.