

Ortung einer Leckage mit dem Ultra-Schnüffler-Testgasverfahren für das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X (W7-X)

Robert BROCKMANN
Feldstraße 99-102H, 17491 Greifswald

Kurzfassung. Das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X, das weltweit größte Stellarator-Experiment seiner Art, wird derzeit in Greifswald aufgebaut und voraussichtlich Ende 2014 in Betrieb genommen. Ziel des Experimentes ist der stationäre Einschluss eines Plasmas mit 3 Tesla in einem supraleitenden magnetischen Käfig. Um auszuschließen, dass das isolierende Vakuum vom magnetischen Käfig aufgrund einer Leckage gebrochen wird, muss sichergestellt werden, dass die Heliumdichtheit des magnetischen Käfigs gewährleistet ist. Zur Gewährleistung der Heliumdichtheit des magnetischen Käfigs erfolgte im Rahmen der Montage des Wendelstein 7-X der Nachweis der Dichtheit sämtlicher Komponenten des magnetischen Käfigs. Neben dem Nachweis der Heliumdichtheit mit den klassischen Testgasverfahren der DIN EN 1779 erfolgte auch der Nachweis der Heliumdichtheit mit einem am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) entwickelten Lecksuchverfahren, dem Ultra-Schnüffel-Testgasverfahren (UST-Verfahren). Mit der verbesserten Empfindlichkeit des UST-Verfahrens um den Faktor 500.000 konnte z. B. bei der supraleitenden Spule eine Leckage von 10^{-06} mbar \cdot l/s im Stimbereich der Spule lokalisiert werden, die mit den klassischen Testgasverfahren der DIN EN 1779 nicht geortet werden konnte.

1. Einführung

Eines der Schlüsselexperimente der Fusion, der Wendelstein 7-X (W7-X), entsteht derzeit an der deutschen Ostsee in Greifswald. Neben der Schwierigkeit in einem ringförmigen Vakuumgefäß einen magnetischen Käfig [Abb.1] mit über 70 supraleitenden Spulen millimetergenau auszurichten, muss zudem gewährleistet sein, dass das supraleitende Spulensystem heliumdicht ist. Bereits die Inbetriebnahme eines DEMO-Kryostatens [1] zeigte, dass bei einer Leckage im magnetischen Käfig mit seinen supraleitenden Spulen, nach der Beaufschlagung des supraleitenden Spulensystems mit Helium, der Vakuumdruck im DEMO-Kryostaten so stark ansteigt, dass das isolierende Vakuum bei

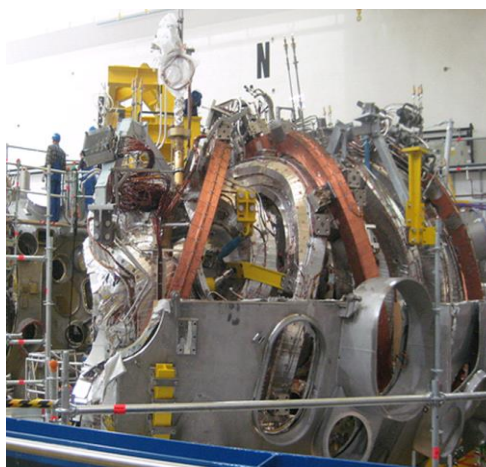


Abb. 1 Magnetischer Käfig des W7-X mit seinem supraleitenden Spulensystem

5×10^{-4} mbar aufgrund von Konvektion gebrochen wurde, so dass der DEMO-Kryostat nicht auf seine Betriebstemperatur von 4,2 Kelvin abgekühlt werden konnte. Des Weiteren zeigte sich, dass mit den Prüfverfahren der DIN EN 1779 [2] eine Lokalisierung von Leckagen nicht möglich war. Aus diesem Grund wurde angeregt die ortsauflösende Lecksuchmethode vom Forschungsinstitut Centre d'Études de Cadarache weiter zu optimieren, um den Bereich der Leckage im Kryostaten örtlich eingrenzen zu können.

2. Ortsauflösende Methode des französischen Forschungsinstitutes Centre d'Études de Cadarache

Im ersten Schritt der Entwicklung eines ortsauflösenden Lecksuchverfahrens wurde die ortsauflösende Methode vom Forschungsinstitut Centre d'Études de Cadarache [3] weiter optimiert. Die Methode beruht darauf, dass in Polyamidschläuchen Volumenströme erzeugt werden, in denen an symmetrisch verteilten Orten Umgebungsluft angesaugt wird und die He-Konzentration in der angesaugten Umgebungsluft bestimmt wird, wobei der natürliche Helium-Untergrund in der Atmosphäre die Empfindlichkeit dieser ortsauflösenden Methode mit 5×10^{-6} mbar·l/s begrenzt. Rechnungen zeigten, dass bei einer Reduzierung des Heliumgehaltes in der Umgebungsluft die Empfindlichkeit dieser Methode deutlich verbessert werden kann. Durch die Entwicklung eines Verfahrens zur Abscheidung von Helium aus Gasen gelang es, die Empfindlichkeit der Methode vom Forschungsinstitut Centre d'Études de Cadarache deutlich zu verbessern. Versuche zeigten aber auch, dass bei einer kurzzeitigen Unterbrechung der Erzeugung von heliumfreiem Gas die Leckrate signifikant ansteigt [Abb.2]. Zur Erhöhung der Systemstabilität wurde das Verfahren zur Abscheidung von Helium so weit verbessert, dass ein stetiger Volumenstrom von heliumfreiem Gas erzeugt werden kann. Zudem wurde in einem weiteren Schritt die Empfindlichkeit des Überdruck-Testgasverfahrens B4 der DIN EN 1779 verbessert. Im Rahmen dieser Entwicklung erfolgte die Entwicklung des Ultra-Schnüffler-Testgasverfahrens (UST-Verfahren).

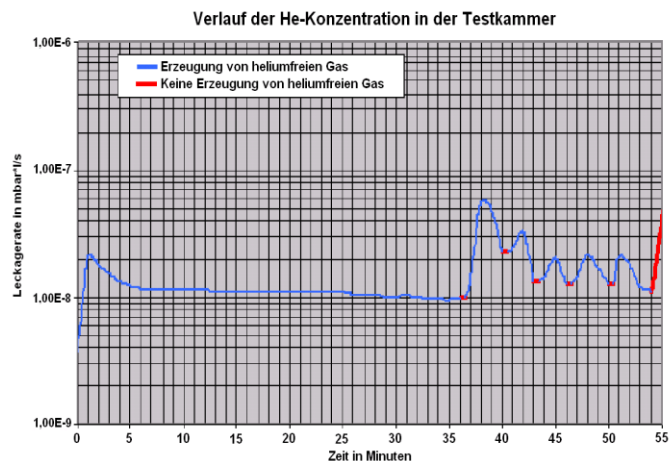


Abb. 2 Verlauf der He-Konzentration bei einer Unterbrechung der Erzeugung von heliumfreiem Gas

3. Das UST-Verfahren

Das am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik entwickelte UST-Verfahren ist nach der DIN EN 1779 ein Überdruck-Testgasverfahren. Grundlage des UST-Verfahrens ist der Partielle-Vakuum-Effekt, der es erlaubt, ein Gas gänzlich von Helium zu reinigen, so dass in einer gänzlich heliumfreien Atmosphäre Leckagen wesentlich leichter geortet werden können. Um sicherzustellen, dass die heliumfreie Atmosphäre in der Testkammer seine Helium-Reinheit behält, bedingt das UST-Verfahren einen Gasgenerator zur Abscheidung von Helium, eine Mess- sowie eine Regelapparatur. Aufgrund der extrem hohen Sensitivität des UST-Verfahrens, des Nachweises eines Heliumatoms auf 1 Trillionen Atome, bestand zu Beginn der Entwicklung keine Möglichkeit, die Empfindlichkeit des UST-Verfahrens mit einem Testleck nachzuweisen. Durch die Entwicklung eines speziellen Testlecks für das

UST-Verfahren, erlaubt dieses Testleck inzwischen, die Empfindlichkeit mit bis zu 2×10^{-9} mbar* l/s nachzuweisen.

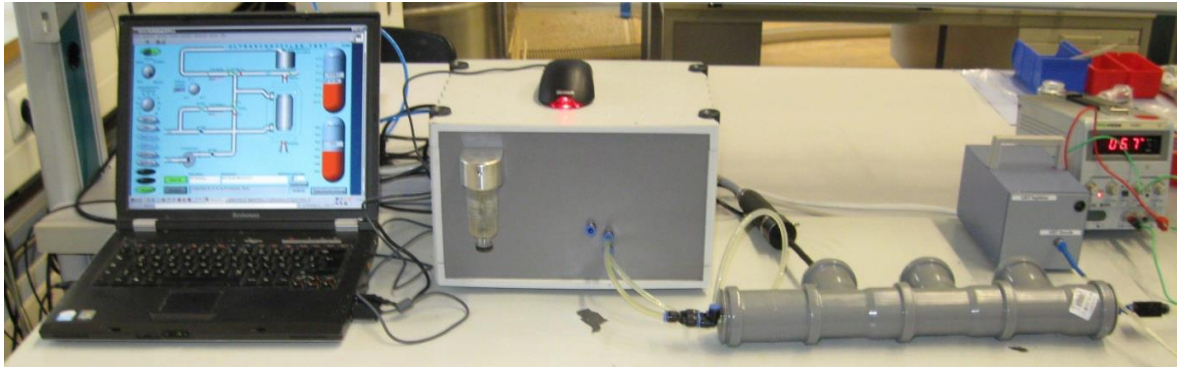


Abb. 3 Das UST-Verfahren

Untersuchungen zeigten weiterhin, dass das UST-Verfahren die gleiche Systemempfindlichkeit wie das Vakuum-Testgasverfahren der DIN EN 1779 mit 1×10^{-11} mbar* l/s besitzt und gegenüber den Überdruck-Testgasverfahren der DIN EN 1779 eine um den Faktor 500.000 höhere Empfindlichkeit hat. Im Gegensatz zum Überdruck-Testgasverfahren der B3 der DIN EN 1779 wird beim UST-Verfahren zur Senkung des Helium-Partialdruckes die Hülle mit einem heliumfreien Gas beaufschlagt. Dieses erlaubt es, den Helium-Partialdruck innerhalb der Hülle von 5×10^{-3} mbar auf kleiner 1×10^{-8} mbar zu reduzieren. Wird ein undichter Prüfling mit Helium beaufschlagt, so steigt der Helium-Partialdruck innerhalb der Prüfkammer signifikant an.

4. Prüfungen mit dem UST-Verfahren

4.1. Ortung einer Leckage in einem Interlayer-Joint mit dem UST-Verfahren

Im Rahmen der Qualifizierung von Interlayer-Joints [4] wurden mehre Samples zum Nachweis der mechanischen Festigkeit mit Drücken oberhalb des Auslegungsdruckes belastet. Nach der Belastung konnte mit dem Vakuum-Testgasverfahren B2.1 der DIN EN 1779 eine Leckage in einem der Interlayer-Joints nachgewiesen werden. Nachdem die Leckage mit dem Überdruck-Testgasverfahren B4, mit dem sogenannten Schnüffelverfahren, nicht geortet werden konnte, erfolgte die Ortung der Leckage mit dem UST-Verfahren. Die Leckage konnte im Bereich der Bodenplatte dieses Interlayer-Joints geortet werden [Abb.5]. Zudem zeigte sich, dass die Leckagerate erst bei einer Beaufschlagung mit 24 bar signifikant von 2×10^{-10} auf 1×10^{-7} mbar* l/s anstieg. Die Charakteristik der Leckage zeigte eindeutig das Verhalten eines Ventil-Lecks.



Abb. 4 Ortung einer Leckage in einem Interlayer-Joint

der Leckage zeigte eindeutig das Verhalten eines Ventil-Lecks.

4.2. Ad-hoc Prüfung einer LHe-Kühlleitung mit dem UST-Verfahren

Erstmalig erfolgte nach der Verlegung einer LHe-Kühlleitung von einer supraleitenden Spule [Abb.4] der Nachweise der Helium-Dichtheit bei einer zentralen Komponente des W7-X. Hierfür wurde im Stirnbereich der supraleitenden Spule die LHe-Kühlleitung in eine Folie eingepackt und diese mit heliumfreiem Gas beaufschlagt. Nach dem Erreichen einer Leckagerate von 5×10^{-10} mbar*/s innerhalb einiger Minuten wurde die Spülung beendet und die LHe-Kühlleitung mit Helium beaufschlagt, wobei die Beaufschlagung mit 10, 22 und 33 bar erfolgte. Selbst bei einer Beaufschlagung der LHe-Kühlleitung mit 33 bar verharrte die Leckrate im Bereich von 5×10^{-10} mbar*/s. Zur Verifizierung des Prüfergebnisses wurde in einem weiteren Schritt die supraleitende Spule in einem Vakuumtank eingebracht, um die integrale Helium-Dichtheit der Spule mit dem Vakuum-Testgasverfahren B2.1 bestimmen zu können. Diese Prüfung bestätigte ebenso die absolute Helium-Dichtheit der verlegten LHe-Kühlleitung.



Abb. 5 Nachweis der Dichtheit einer LHe-Leitung

4.3. Ortung einer Leckage in einem komplexeren Bauteilen in einer Testkammer

Für die Lokalisierung einer Leckage in einem großvolumigen Balg wurde dieser in eine Testkammer mit einem Volumen 360 Liter eingebracht [Abb.6]. Nach der Spülung der Testkammer auf eine Leckrate von 1×10^{-11} mbar*/s wurde der Balg mit Helium beaufschlagt und über Öffnungen in der Testkammer abgeschnüffelt. Bei der Lecksuche konnte eine Leckage im Balg im Bereich einer UHV-Schweißnaht geortet werden. Die Leckagerate stieg zudem bei einer mechanischen Streckung des Balges signifikant von 1×10^{-07} auf 7×10^{-07} mbar*/s an. Erst bei der mechanischen Streckung des Balges erreichte die Leckagerate ihr Maximum. Nach der Reparatur wurde der Balg erneut in die Testkammer eingebracht und erneut mit Helium beaufschlagt. Die Prüfung ergab, dass selbst bei einer Beaufschlagung des Balges mit 33 bar die Leckagerate innerhalb der Testkammer bei 1×10^{-11} mbar*/s verharrte, so auch im reparierten Bereich des Balges.



Abb. 6 Ortung einer Leckage in einer Testkammer

4.4. Ortung einer Leckage bei einer supraleitenden Spule

In Vorfeld der Montage des Wendelstein 7-X wurden zur Qualitätssicherung sämtliche supraleitenden Spulen auf deren Betriebstemperatur abgekühlt. Zudem wurde während der Abkühlung auf LHe-Temperatur (4,2 Kelvin) sowie bei der anschließenden Erwärmung der supraleitenden Spulen auf Raumtemperatur die Leckagerate bestimmt. Bei diesen Prüfungen konnte nachgewiesen werden, dass einige der W7-X Spulen ihre Heliumdichtheit während der Abkühlung auf flüssige Heliumtemperatur einbüßten [5]. Zum Beispiel stieg bei der supraleitende Spule ABB16 die Leckagerate aufgrund der Abkühlung auf LHe-Temperatur signifikant an. Zur Eingrenzung der Leckage wurde im ersten Schritt der Ortung der Leckage das Gehäuse der Spule mit seinen in Kunststoff eingegossen Supraleitern über Öffnungen im Spulengehäuse, den PIN-Löchern, mit heliumfreiem Gas gespült [Abb.7]. Nach dem Erreichen einer Leckagerate von 5×10^{-11} mbar·l/s nach 12 Stunden wurde die Spule mit 33 bar Helium beaufschlagt. Zudem wurde zur Eingrenzung der Leckage der Beaufschlagungsdruck mit heliumfreiem Gas um 10 mbar angehoben, damit in den PIN-Löchern des Gehäuses die Leckagerate bestimmt werden konnte. Weiterhin wurden gerichtete Strömungen über die PIN-Löcher erzeugt, um den Bereich der Leckage zuverlässiger im Stirnbereich der supraleitenden Spule eingrenzen zu können. Aus diesem Grund erfolgte das Aufschlitzen der Hochspannungsisolation von den fünf Interlayer-Joints der Spule. Zur Ortung der Leckage wurden die aufgeschlitzten Bereiche eingehüllt [Abb.8], wobei die Messungen mit dem UST-Verfahren zeigten, dass nur beim dritten Interlayer-Joint die Leckagerate signifikant auf bis zu 2×10^{-7} mbar·l/s anstieg. Zur weiteren Lokalisierung wurde die Hochspannungsisolation dieses Interlayer-Joints in Schritten abgefräst und nach jedem Teilschritt der abgefräste Bereich mit dem Überdruck-Testgasverfahren B4 der DIN EN 1779 abgeschnüffelt, ohne dass die Leckage geortet werden konnte. Erst durch den Einsatz des UST-Verfahrens konnte die Leckage im Bereich einer Schweißnaht des Interlayer-Joints geortet werden [6]. Zur Bestimmung der integralen Leckagerate mit dem Vakuum-Testgasverfahren B2.1 der DIN EN 1779 wurde die Spule ABB16 nach der Reparatur des Interlayer-Joints erneut in den Vakuumtank eingebracht. Bei dieser Prüfung konnte die Helium-Dichtheit der Spule ABB16 zuverlässig bestätigt werden [7].



Abb. 8 Spülung einer W7-X Spule mit heliumfreiem Gas

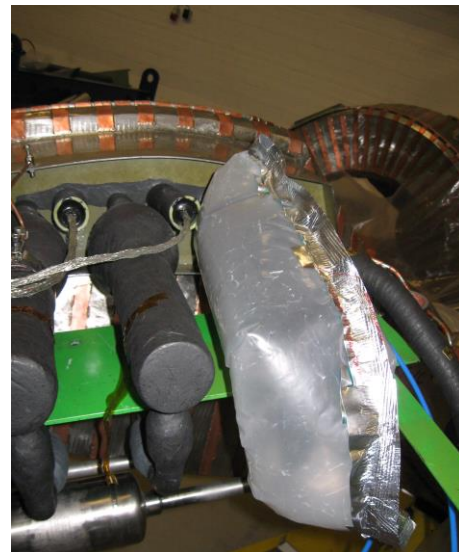


Abb. 7 Ortung der Leckage im Stirnbereich der Spule ABB16

4.5. Ad-hoc-Prüfung einer beschädigten LHe-Kühlleitung mit dem UST-Verfahren

Im Rahmen der Qualitätssicherung wurde festgestellt, dass eine LHe-Kühlleitung bei einer supraleitenden Spule durch die Montage beschädigt wurde. Aus diesem Grund erfolgte mit dem UST-Verfahren der Nachweis der Helium-Dichtheit der beschädigten LHe-Kühlleitung. Zum Nachweis der Helium-Dichtheit wurde der Bereich mit der Beschädigung eingehüllt und mit dem UST-Verfahren die Leck-agerate bestimmt [Abb.9]. Die Prüfung zeigte, dass die LHe-Leitung mit einer integralen Leckrate von kleiner 5×10^{-11} mbar*l/s absolut heliumdicht war.



Abb. 9 Nachweis der Dichtheit einer LHe-Leitung

5. Schlussfolgerung

Gegenüber dem klassischen Überdruckverfahren erlaubt das UST-Verfahren Prüflinge schnell und zuverlässig auf deren Gasdichtheit zu prüfen. Außerdem gilt, dass beim Nachweis einer Leckage diese gleichfalls mit dem UST-Verfahren geortet werden kann. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass das UST-Verfahren sich in puncto Zuverlässigkeit mit den Vakuum-Testgasverfahren messen lassen kann. Die Prüfungen mit dem UST-Verfahren zeigten auch, dass die Aufwendung um 70% zur Leckortung gegenüber dem Vakuum- und den Überdruck-Testgasverfahren, aufgrund der um den Faktor 500.000 erhöhten Empfindlichkeit des UST-Verfahrens, verringert werden kann [Abb.10].

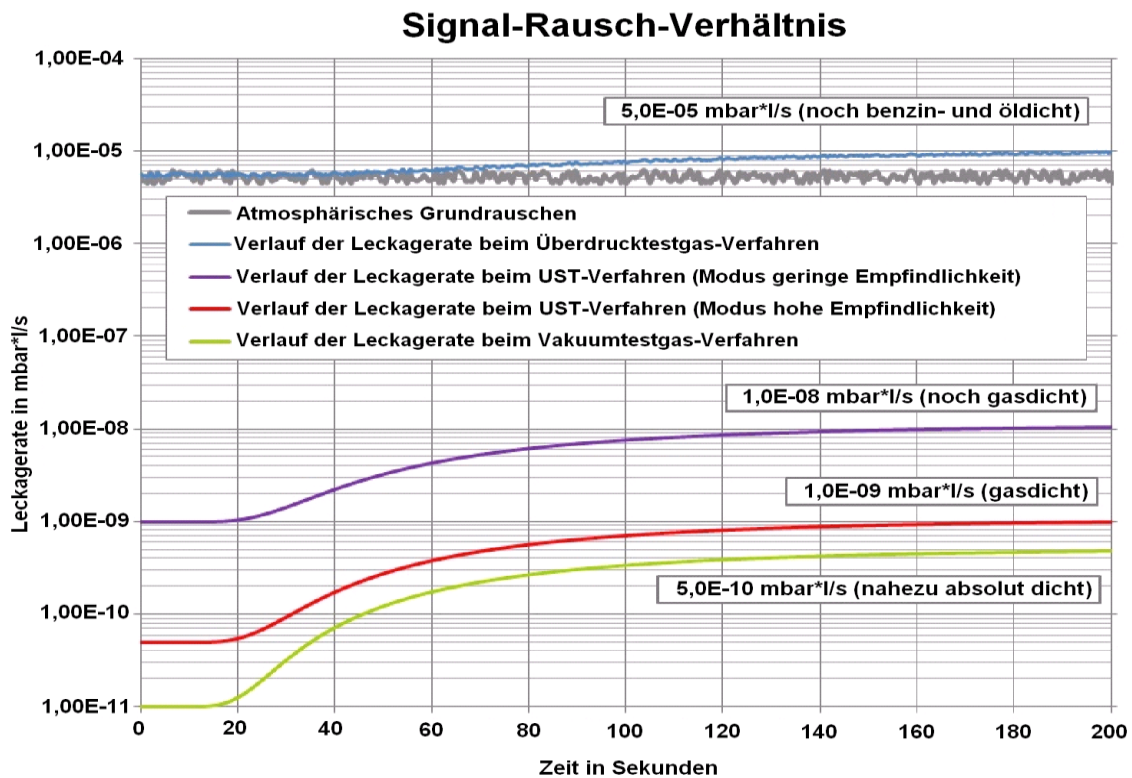


Abb. 10 Vergleich der Empfindlichkeit des UST-Verfahrens mit den Testgasverfahren B3 und B2.1 der DIN EN 1779

Zudem konnte gezeigt werden, dass selbst kleinste Leckagen in äußerst komplexen Prüflingen zuverlässig geortet werden können. Selbst kleinste Leckagen, die bisher nur sehr schwer oder gar nicht ortbar waren, sind mit dem UST-Verfahren ortbar, so dass mit dem UST-Verfahren Bauteile wesentlich einfacher auf deren Gasdichtheit geprüft werden können. Dieses zeigt auch die Lecksuche bei der Spule ABB16, bei der mit dem UST-Verfahren selbst eine Leckage in einem in Kunststoff vergossenen Prüfling lokalisiert werden konnte.

Referenzen

- [1] Robert Brockmann: 1-FCA-T0009.0 DEMO-Kryostat, Abschlussbericht
- [2] Gerald Schröder: Neue Norm zur Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Lecksuche und Dichtheitsprüfung, ZfP-Zeitung 74, April 2001
- [3] F. Minot, G. Bon Mardion, B. Jager, B. Gravit, JL. Marechal, JL. Violet: A New Concept to Detect He Leaks on Tore Supra Cryogenic Plant; F. Minot, G. Bon Mardion, B. Jager, B. Gravit, JL. Marechal, JL. Violet: Elsevier, Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference, Pages 689–692, 1997
- [4] Babcock Noell: Industrial view on fusion - manufacturing experience on W7-X (http://www-fusion-magnetique.cea.fr/matefu/school_2/Monday/borlein-Industrial view to the Fusion with W7X coils.pdf)
- [5] Robert Brockmann: Verlust der Heliumdichtheit, Verletzung der Passivschicht beim Werkstoff Aluminium, Vakuum in Forschung und Praxis, Volume 26, Issue 2, pages 19–22, April/Mai 2014
- [6] Robert Brockmann: Ultra-Schnüffel-Testgasverfahren auf Grundlage des Partial-Vakuum-Effekts, Vakuum in Forschung und Praxis, Volume 25, Issue 6, pages 19–21, Dezember 2013
- [7] H. Viebke, D. Gustke, T. Rummel, C. Sborchia, R. Schroeder, D. Williams, S. Bates, B. Leigh, R. Winter: Lessons learned from the manufacture of the W7-X planar coils, Institute of Physics Publishing Journal of Physics, Conference Series 43, Pages 748–752, 2006