

HEXOS: neue VUV-Spektrometer für die Fusionsforschung

Holographische korrigierte Beugungsgitter erschließen den tiefen vakuum-ultravioletten Wellenlängenbereich

Wolfgang Biel, Rainer Burhenn, Erick Jourdain, Franz-Josef Schäfer und Didier Lepere

Die Spektroskopie im vakuum-ultravioletten (VUV-) Spektralbereich ist einer der wichtigsten experimentellen Zugänge, um Verunreinigungen in magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasmen zu beobachten. Plasmaverunreinigungen (d. h. alle Elemente mit einer Kernladungszahl $Z \geq 2$) treten im Fusionsplasma aufgrund der Erosion von Wandmaterial auf (z. B. B, C, O, Si, Fe, W), werden absichtlich zu diagnostischen Zwecken oder zur Herabsetzung der Wandbelastung ins Plasma eingeführt (N, Ne, Ar, Kr), oder sie entstehen als Asche des Fusionsprozesses (He). In jedem Falle verdünnen die Verunreinigungen den Fusionsbrennstoff (Wasserstoffisotope) und kühlen das Plasma durch verstärkte Abstrahlung. Die Beobachtung und Kontrolle des Verunreinigungsgehalts gehört daher zu den Kernaufgaben der Diagnostik von Fusionsplasmen. Die intensivsten Spektrallinien der relevanten Plasmaverunreinigungen und ihrer Ionen liegen im VUV-Wellenlängenbereich (ca. 1–200 nm). VUV-Spektrometer gehören daher zur Standardausstattung jedes Fusionsexperiments.

Dr. Wolfgang Biel, Institut für Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich; Dr. Rainer Burhenn, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Wendelsteinstraße, 17489 Greifswald; Dr. Erick Jourdain, Dr. Didier Lepere, HORIBA Jobin Yvon SAS, 16-18 Rue du Canal, 91165 Longjumeau Cedex, France; Franz-Josef Schäfer, HORIBA Jobin Yvon GmbH, Chiemgaustr. 148, 81549 München

Mit Blick auf den anstehenden Langpuls- oder Dauerstrichbetrieb von Fusionsplasmen (Wendelstein 7-X, ITER) und die damit verbundenen extremen Anforderungen an die Wandmaterialien verstärkt sich die Notwendigkeit zu einer umfassenden Überwachung des Verunreinigungsgehalts im Plasma. Da derzeit verschiedene Kombinationen von Wandmaterialien auf ihre Eignung für Langpulsbetrieb hin untersucht werden, muss die VUV-Spektroskopie entsprechend ausgelegt sein, um alle relevanten Teilchensorten simultan erfassen zu können – die Vielzahl der Spektrallinien erfordert die Beobachtung eines breiten Spektralbereichs bei gleichzeitig guter Wellenlängenauflösung. Gleichzeitig ist es notwendig, neben den Konzentrationen

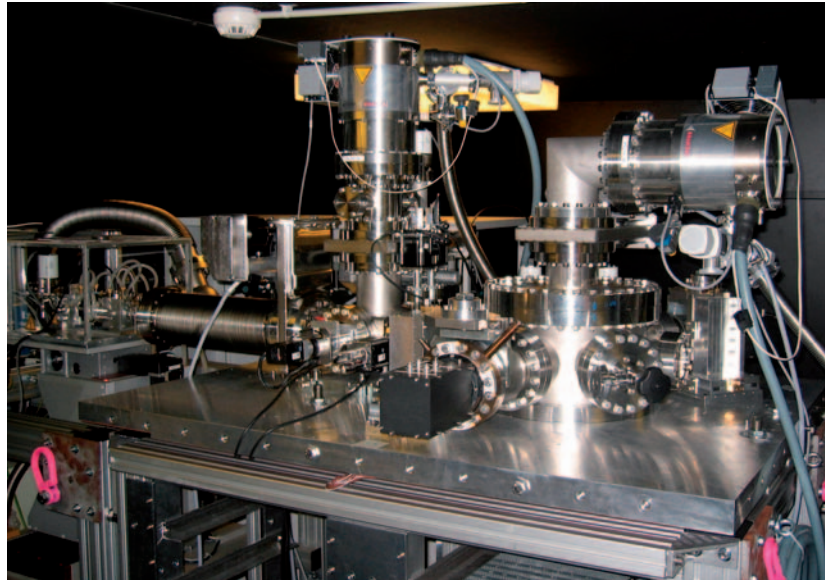


Abb. 1: Laboraufbau von HEXOS 5&4 mit Hohlkathodenlichtquelle.

auch die Transporteigenschaften der Verunreinigungen im Plasma zu verstehen, um Plasmaszenarien mit zentraler Verunreinigungsakkumulation erkennen und vermeiden zu können. Für diese Aufgaben werden VUV-Spektrometer mit hoher Zeitauflösung (d. h. hohe Gesamteffizienz) benötigt, um transiente Ereignisse analysieren bzw. gezielte Experimente zum Verunreinigungstransport durchführen zu können.

Da im tiefen VUV-Bereich transmittierende Optiken nicht zur Verfügung stehen und auch die Reflektivität von Oberflächen stark abnimmt, verwenden Spektrometer in diesem Wellenlängenbereich in der Regel ein reflektives Beugungsgitter auf einem gekrümmten Substrat (konkav, toroidal) als einziges op-

portives Element, welches die Dispersion sowie die Abbildung des Eintrittsspalts auf den Detektor übernimmt. Für eine ausreichende Gittereffizienz ist für Wellenlängen unterhalb von etwa 50 nm ein zunehmend streifender Lichteinfall notwendig, der wiederum den Öffnungswinkel und damit die Lichtstärke reduziert.

Bislang wurden an Fusionsexperimenten häufig noch klassische VUV-Spektrometer mit konkaven und zumeist mechanisch geritzten Beugungsgittern eingesetzt, bei denen der Detektor tangential am Rowland-Kreis montiert wurde [1]. Aufgrund der Projektion des Eintrittsspalts auf den schräg stehenden Detektor ist die Auflösung bei vorgegebenem Wellenlängenbereich begrenzt; ferner

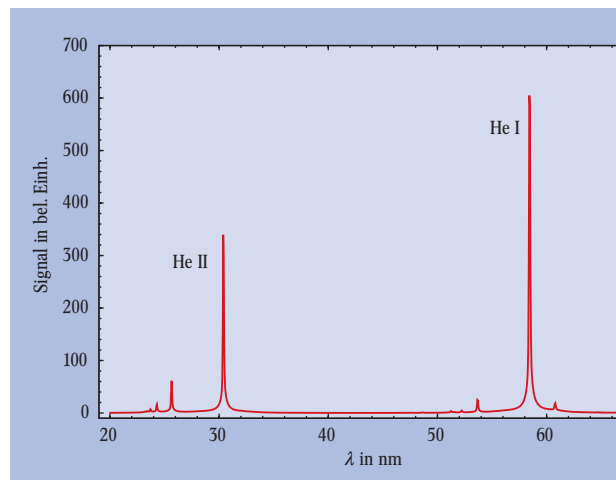


Abb. 2: Spektrum einer Hohlkathodenentladung in Helium, gemessen mit HEXOS 5.

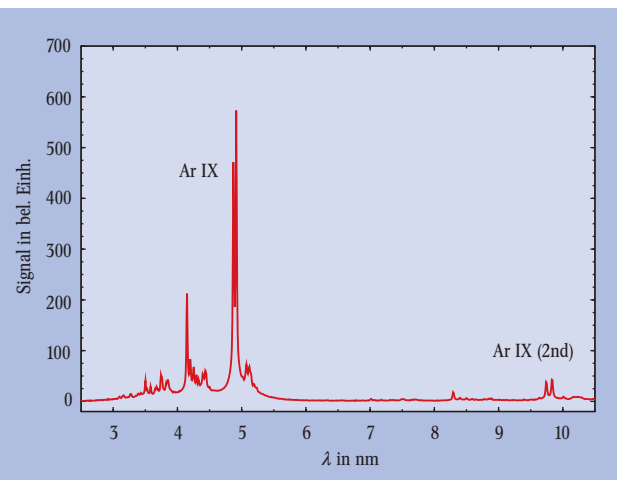


Abb. 3: Spektrum einer Pinch-Entladung in Argon, gemessen mit HEXOS 1.

führt der Astigmatismus des Konkavgitters bei vorgegebener Detektorhöhe zu geometrischen Verlusten und damit zu einer insgesamt reduzierten Effizienz. Daneben gibt es eine kleine Anzahl von Spektrometertypen mit holographischen korrigierten Beugungsgittern auf toroidalem Substrat, die seit Ende der 70er-Jahre bei Horiba Jobin Yvon in Frankreich entwickelt wurden [2]. Ein Spektrometersystem, welches einen breiten Spektralbereich mit guter Auflösung und hoher Effizienz erfasst, war bisher nicht verfügbar. Diese Lücke schließt nun das neue HEXOS-System (High Efficiency XUV Overview Spectrometer), welches im Rahmen einer Kollaboration zwischen dem Institut für Plasmaphysik im Forschungszentrum Jülich (FZJ), dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald sowie Horiba Jobin Yvon (Frankreich) für den späteren Einsatz am neuen Stellarator W7-X in Greifswald entwickelt und gebaut wurde. Tabelle 1 zeigt die wesentlichen Parameter der vier Spektrometerkanäle.

Tabelle 1: Daten der HEXOS-Spektrometerkanäle

HEXOS Kanal Nr.	1	2	3	4
Wellenlängenbereich in nm	2,5 - 10,5	9 - 24	20 - 66	60 - 160
Auflösung in nm	0,05	0,05	0,13	0,26
Etendue in $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ sr}$	0,3	1,0	2,0	2,0

Kernstück der HEXOS-Spektrometer sind vier verschiedene abbildende holographische korrigierte Beugungsgitter auf toroidalem Substrat, deren optisches Design durch das FZJ mit Hilfe eines neuen Optimierungsverfahrens [3] entwickelt und die durch Horiba Jobin Yvon gefertigt wurden. Die Spektren werden mit optimierten offenen MCP-Detektoren detektiert (Burle Inc., mit Hochspannungsversorgung durch F.U.G. Rosenheim), deren Signale durch schnelle Kameras mit linearen Arrays [4] ausgelesen werden. Der mechanische Spektrometernaufbau (Horiba Jobin Yvon) wurde UHV-kompatibel und robust ausgelegt. Die Geometrie des Aufbaus mit zwei Doppelspektrometern, die jeweils eine massive Grundplatte als einziges tragendes Element verwenden, erlaubt die Montage aller vier Spektrometer an einem einzigen Beobachtungsstutzen an W7-X. Das zweistufige differentielle Pumpsystem mit magnetisch gelagerten Turbo-Molekularpumpen (Pfeiffer Vacuum) erzeugt ein kohlenwasserstofffreies Ultrahochvakuum (10^{-8} mbar) in der Spektrometerkammer, welches für die Lebensdauer der Beugungsgitter sowie zum Betrieb der MCP-Detektoren wesentlich ist.

Für die Labortests wurden eine Hohlkathoden-Lichtquelle [5] für HEXOS 3&4 sowie eine Pinch-Lichtquelle (AIXUV, Aachen) für HEXOS 1&2 eingesetzt. Da beide Plasma-Lichtquellen nur einen kleinen Bruchteil der Spektrometer-Akzeptanzwinkel ausleuchten können, sind diese jeweils auf einer x-y-Verschiebemechanik montiert (Schneeberger) und werden über einen Wellenbalg an die Spektrometer angekoppelt. Durch Verschiebung der Lichtquellen senkrecht zur Einstrahlrichtung lässt sich der Akzeptanzwinkel

der Spektrometer ausmessen und die Fokussierung der Spektrallinien auf den Detektor überprüfen. Abb. 1 zeigt den Laboraufbau von HEXOS 3&4 mit Hohlkathodenlichtquelle.

Die gemessenen Testspektren zeigen, dass die angestrebten Daten für Wellenlängenbereiche und Auflösung der vier HEXOS-Spektrometerkanäle gut erreicht werden. So kann bei HEXOS 3 die Lyman-Serie des wasserstoffartigen Heliums (HE II) bis hin zu $L\zeta$ (7-1-Übergang) aufgelöst werden (Abb. 2). Bei HEXOS 1 kann das Ar-IX-Douplet bei 4,873 nm / 4,918 nm gut getrennt werden (Abb. 3). Die Intensität der zweiten Beugungsordnung ist für alle HEXOS-Kanäle gering, was für die spätere Auswertung von Übersichtsspektren von Fusionsplasmen mit entsprechend zahlreicheren Spektrallinien von wesentlicher Bedeutung ist.

In einer mehrjährigen Testphase an TEXTOR soll das HEXOS-System weiter optimiert werden. Hierbei geht es einerseits um die Entwicklung einer Automatisierung (SIMATIC), andererseits gilt es, die Identifikation von Spektrallinien, die Entwicklung von Auswertemethoden und die Analyse von transienten Transportexperimenten voranzutreiben, um das Gesamtsystem mit Blick auf die Anwendung an W7-X weiter zu ertüchtigen.

Die erfolgreiche Entwicklung des HEXOS-Systems setzt einen neuen Standard für die VUV-Spektroskopie an Fusionsexperimenten. Die neuen HEXOS-Spektrometerkanäle sind sowohl als Gesamtsystem als auch einzeln an Fusionsexperimenten oder anderen Hochtemperaturplasmen einsetzbar. Das für die Entwicklung verwendete Optimierungsverfahren wurde inzwischen bereits für die Entwicklung eines 6-Kanal-VUV-Spektrometersystems für das Fusionsexperiment ITER eingesetzt, hat sich aber auch in anderen Bereichen der VUV-Spektroskopie bewährt [6]. Optimierte Beugungsgitter können demnach für praktisch jeden gewünschten Wellenlängenbereich im VUV-Bereich nach Kundenspezifikation entwickelt werden, sodass in diesem Gebiet für jede Messaufgabe eine spezifische und optimale Lösung ermöglicht wird.

[1] J. L. Schwob et al., Rev. Sci. Instrum. **58**, 1601 (1987)
 [2] R. J. Fonck et al., Appl. Opt. **21**, 2115 (1982)
 [3] W. Biel et al., Rev. Sci. Instrum. **75**, 2471 (2004)
 [4] W. Biel et al., Rev. Sci. Instrum. **75**, 3268 (2004)
 [5] K. Danzmann et al., Appl. Opt. **27**, 4947 (1988)
 [6] R. Lebert et al., Proc. SPIE **5374**, 808 (2004)

Präzision in Perfektion



Optische Strahlführungssysteme

Positioniersysteme



Optische Strahlführungssysteme



Optische Komponenten



Manuelle Positioniersysteme



Motorisierte Positioniersysteme



Nano-Positioniersysteme



Sonderbau

Besuchen Sie uns auf der
OPTATEC
 Halle 3, Stand D15

OWIS GmbH
 Im Gaisgraben 7
 79219 Staufen (Germany)
 Tel. + 49 (0) 76 33 / 95 04 - 0
 Fax + 49 (0) 76 33 / 95 04 - 44
 info@owis-staufen.de
 www.owis-staufen.de