

P 2: Diagnostics

Time: Monday 14:00–18:10

Location: B 305

Topical Talk

P 2.1 Mo 14:00 B 305

Orts- und zeitaufgelöste Dichtemessung in reaktiven Plasmen mit der Plasma-Absorptionssonde — ●CARSTEN SELLE, MARC BÖKE und JÖRG WINTER — Institut für Experimentalphysik II, Center for Plasma Science and Technology, Ruhr-Universität Bochum

Die Plasma-Absorptionssonde ist ein effektives Messsystem zur Bestimmung der Elektronendichte, besonders in reaktiven Plasmen. Die Messmethode beruht auf der aktiven Resonanzspektroskopie, bei der mit Hilfe eines Netzwerk-Analysators der S11-Parameter einer im Plasma befindlichen Monopolantenne gemessen wird. Eine dielektrische Abschirmung schützt die Sonde gegen Einflüsse reaktiver Plasmen, so dass unter Bedingungen gemessen werden kann, bei denen z. B. eine Langmuir-Sonde nicht einsetzbar ist. Ortsaufgelöste Messungen zur Erstellung von Dichteprofilen sind so einfach möglich. Auch zeitlich variierende Elektronendichten, beispielsweise in einer gepulsten Plasmaentladung, können gemessen werden. Zur Zeit wird eine Zeitauflösung von 10 Mikrosekunden erreicht.

P 2.2 Mo 14:25 B 305

Aktive Plasmaresonanzspektroskopie mit der Multipolresonanzsonde — ●RALF PETER BRINKMANN, MARTIN LAPKE, THOMAS MUSSENBRÖCK, TIM NIEDZALKOWSKI und JENS OBERRATH — Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Ruhr-Universität Bochum

Aktive Plasmaresonanzspektroskopie ist ein aussichtsreiches Konzept für eine prozessverträgliche und fertigungskompatible Plasmadiagnostik. Das Prinzip beruht auf der charakteristischen Eigenschaft von Niederdruckplasmen, bei Anregung mit einem Hochfrequenzsignal ω nahe der Elektronenplasmafrequenz ω_{pe} in ausgeprägte Resonanz zu geraten. Aus der Beobachtung des Resonanzverhaltens mit Hilfe einer geeigneten Messmethode lassen sich dann Rückschlüsse auf den Zustand des Plasmas ziehen. Bekannt und in der Literatur genannt sind die hairpin probe, die plasma absorption probe, und die plasma transmission probe. Allerdings weisen die bekannten Verfahren zwei Schwachstellen auf: Die Verfahren liefern nicht immer eindeutig interpretierbare Messergebnisse und sie sind zu kostenaufwendig. Dieser Vortrag beschreibt eine neue Umsetzung des Konzeptes. Die Multipolresonanzsonde ist eine dielektrisch umhüllte Anordnung zweier voneinander isolierter Halbkugeln, die mit den Polen einer auch als Halterung dienenden Hochfrequenz-Zuleitung verbunden sind. Eine mathematische Analyse des Systems Sonde/Plasma zeigt, dass die Systemimpedanz als Summe unendlich vieler Multipolmoden beschrieben werden kann; ihre jeweilige Lage und Dämpfung enthält die gesuchten Informationen über das Plasma.

P 2.3 Mo 14:40 B 305

Absolute, räumliche Dichtebestimmung von NH und NH₂ Radikalen in einem Mikroplasma mit Planar-LIF und Cavity Ring-Down Spektroskopie — ●MARTIN VISSER, ANDREAS SCHENK und KARL-HEINZ GERICKE — Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, TU Braunschweig

Für das Verständnis der bestimmenden Mechanismen bei plasmachemischer Oberflächenfunktionalisierung von Kunststoffen ist die Art und Dichte der in dem Prozess aktiven Spezies von Bedeutung. In unserer an einem kapazitiv gekoppelten Mikroplasma durchgeführten Untersuchung stehen die Radikale NH und NH₂ im Mittelpunkt. Diese stehen im Verdacht bei der Funktionalisierung von Polymeroberflächen mit stickstoffhaltigen Gruppen (Amino, Nitril) eine tragende Rolle zu spielen. Ziel ist Bestimmung der absoluten Dichte und der räumlichen Verteilung der beiden Spezies. Zu diesem Zweck werden zwei etablierte spektroskopische Techniken kombiniert, Planare Laserinduzierte Fluoreszenz und Cavity Ring-Down Spektroskopie. Erstere ermöglicht durch zweidimensionale Anregung und Detektion (abgeflachter Laserstrahl bzw. ICCD-Kamera) mit hoher Zeitauflösung ein Dichteprofil zu erstellen, letztere ermöglicht eine absolute Konzentrationsmessung mit welcher die PLIF-Daten kalibriert werden.

P 2.4 Mo 14:55 B 305

First Results Of Streamer Formation During Dielectric Surface Flashover At Atmospheric Pressures — ●KLAUS FRANK, JIM DICKENS, LYNN HATFIELD, MAGNE KRISTIANSEN, GEORGE LAITY, ANDREAS NEUBER, and GARRETT ROGERS — Center for Pulsed Power and Power Electronics, Box 43102, Lubbock, TX 79409-

3102, USA

This paper describes some initial results from an experimental setup designed for studying the optical emission during pulsed surface flashover at atmospheric gas pressure for the wavelength range between 115 nm to 180 nm at atmospheric pressures. Typical discharge parameters at atmospheric pressure are a flashover spark length of about 8 mm under a pulsed (thyristor switched) 35 kV, 20 A excitation. Experimental results of streamer formation recorded with a CCD camera (Andor 734) having a high sensitivity and a good resolution in space and time are presented. One important parameter on which the streamer formation and the subsequent breakdown strongly depends is the gas composition. That is why the streamer formation was recorded for gated intervals from 4 to 50 ns in standard nitrogen, oxygen and purified oxygen and nitrogen. It can be concluded that most of the VUV emission occurs during the streamer formation stage of the flashover event. This is important because it is believed only radiation below 180 nm is energetic enough to cause photoionization leading to the development of a streamer discharge. Since up to now little is known about VUV emission during this initial stage, more time-resolved experiments are necessary.

P 2.5 Mo 15:10 B 305

Aktive Resonanzspektroskopie in Niederdruckplasmen: Analyse verschiedener Konzepte — ●MARTIN LAPKE, JENS OBERRATH, THOMAS MUSSENBRÖCK und RALF PETER BRINKMANN — Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Ruhr-Universität Bochum

Eine industriekompatible Plasmadiagnostik muss robust und stabil sein, soll eine eindeutige und kalibrationsfreie Auswertung ermöglichen, und darf den zu überwachenden Prozess weder elektrisch noch chemisch stören, Anschaffung, Unterhalt und Platzbedarf müssen vertretbar sein. Gerade im Fall schichtabscheidender Plasmaprozesse, wie sie z.B. in den optischen Technologien vielfach zur Anwendung kommen, sind diese Forderungen besonders schwer zu erfüllen. In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Realisierungen des Grundprinzips der aktiven Resonanzspektroskopie vorgeschlagen [1]. Eine wichtige Klasse dieser Methoden basiert auf sogenannten Oberflächenmoden, die unterhalb der Plasmafrequenz angeregt werden.

Ausgehend von funktionalanalytischen Methoden wird ein Modell für diese Klasse von Methoden entwickelt, das für beliebige Bauformen anwendbar ist. Die Lösung zeigt, dass ein möglichst symmetrisches Design die ideale Bauform darstellt. Als Beispiel sei die MRP [2] erwähnt, die zum Einen eine algebraische Lösung des Resonanzverhalten erlaubt, und zum Anderen durch ihren Dipolcharakter das Plasma nur lokal stört.

[1] Braithwaite et al., Plasma Sources Sci. Technol. **18** 014008 (2009)[2] Lapke et al., Appl. Phys. Lett. **93**, 051502 (2008)

P 2.6 Mo 15:25 B 305

Influence of the DC-Stark Effect on the Interpretation of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy — ●WALDEMAR HÜBERT, PETER KOHNS, and GEORG ANKERHOLD — RheinAhrCampus, University of Applied Sciences Koblenz, Südallee 2, 53424 Remagen, GERMANY

A serious drawback of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) are line broadening and line shifting effects which often prevent the elemental identification of an unknown sample. By determining the temporal dependency of several plasma parameters like the plasma particle density, plasma temperature and the volume of the plasma cloud we show that the DC-Stark effect is the predominant cause for line broadening and line shifting. The DC-Stark effect strongly depends on the free charge carrier density inside the laser-generated microplasma which in turn decreases over the time as the plasma expands and the carriers recombine. These observations lead to suggestions for improved automatic LIBS software promising a smaller probability of wrong elemental identification and making LIBS more attractive for industrial applications.

P 2.7 Mo 15:40 B 305

Electron density measurements of an inductive coupled plasma with a one port microwave interferometer — ●MATHIAS ANDRASCH, JÖRG EHLBECK, JENS HARHAUSEN, RÜDIGER FOEST, and KLAUS-DIETER WELTMANN — Leibniz-Institut für Plasmaforschung

und Technologie e.V.

The electron density is one of the fundamental parameters of non equilibrium plasmas. A standard microwave interferometer method is the two port measurement, which requires two accessible windows in the reactor. Most industrial plasma reactors, however, have only one accessible window, thus favoring a one port microwave interferometer method where a microwave mirror is placed at the opposite side of the reactor wall. The interferometer works at 45.5 GHz and separates the forwarded and the reflected wave. With this system the line integrated electron densities in an inductive coupled plasma (13.56 MHz) (Ar, N₂, 0.2-8.0 Pa, 30-1000 W) are determined. Langmuir probe measurements provide the radial profile of the electron density. These profiles are fitted with Bessel functions and serve for the determination of spatially resolved density values from the microwave interferometric measurements. The densities are in good agreement with the Langmuir probe results. Maximum values $1 \cdot 10^{18} m^{-3}$ are obtained in the center of the vessel at an axial distance of 0.24 m from the antenna window of the ICP source. (Partially Funded by BMBF, FKZ: 13N9320)

P 2.8 Mo 15:55 B 305

Bestimmung der Elektronendichte im Divertor von ASDEX Upgrade mit Hilfe der Stark-Verbreiterung der Balmer-Linien — ●STEFFEN POTZEL, RALPH DUX, ANDREA SCARABOSIO, MARCO WISCHMEIER und DAS ASDEX UPGRADE TEAM — Max Planck Institut für Plasmaphysik, EURATOM Assoziation, Garching, Deutschland

An ASDEX Upgrade ist eine neue Methode zur Bestimmung der Elektronendichte im Divertor, basierend auf der Stark-Verbreiterung der Balmer-Linien, entwickelt worden.

Dabei wird ein theoretisches Linienprofil im 'least square' Sinne mit der Elektronendichte als Parameter an die gemessene Balmer-Linie gefittet. Das theoretische Profil wird mit Hilfe der Tabellen von Stehlé und Hutcheon nach der Model Microfield Method (MMM) und unter Berücksichtigung von Zeeman-Effekt, Doppler-Verbreiterung und Spektrometerprofil berechnet. Die Messung der Balmer-Linie erfolgt mit einem Gitterspektrometer. Die gleichzeitige Messung von elf Sichtlinien mit einer Zeitauflösung von 4ms ermöglicht die linienintegrierte Bestimmung der poloidalen Verteilung der Elektronendichte.

Der Einfluß der Reflexion von Strahlung an den Wolframkacheln auf die Messung ist mit der Installation neuer Sichtlinien, die in einem Spalt zwischen zwei Kacheln enden, signifikant reduziert worden. Weiterhin sind diese Messungen konsistent mit anderen Divertordiagnostiken.

20 min. break.

P 2.9 Mo 16:30 B 305

Improved self-energy calculations for pressure broadening of spectral lines in dense plasmas — ●SONJA LORENZEN¹, AUGUST WIERLING¹, HEIDI REINHOLZ^{1,2}, and GERD RÖPKE¹ — ¹Institut für Physik, Universität Rostock, Deutschland — ²Institut für Theoretische Physik, Johannes Kepler Universität Linz, Österreich

Pressure broadening of Lyman-lines of hydrogen-like lithium (Li²⁺) is studied using a quantum statistical approach to the line shape in dense plasmas [1]. The electronic self-energy, which is an important correlative effect, enters into the line profile calculations as a basic input. So far, we have neglected the effect of strong, i.e. close, electron-emitter collisions, but they play generally an important rôle in dense plasmas, as has already been shown by Griem in [2].

We present a method to calculate an improved electronic self-energy including strong collisions based on a two-body T-matrix and an effective optical potential including non-local exchange effects [3]. The method is tested for level broadening of the ground state and the 2p state of hydrogen and compared to other T-matrix results [4]. The implications for the Lyman lines of Li²⁺ are discussed, too.

[1] S. Lorenzen et al., *Contrib. Plasma Phys.* **48**, 657 (2008)

[2] H. R. Griem, *Spectral line broadening by plasmas* (Academic Press, London, 1974)

[3] S. Lorenzen et al., to appear in *Contrib. Plasma Phys.*, **50** (2010)

[4] S. Günter, *Phys. Rev. E* **48**, 500 (1993)

P 2.10 Mo 16:45 B 305

In-medium modification of K-line emission profiles of warm dense matter — ●ANDREA SENGEBUSCH, HEIDI REINHOLZ, and GERD RÖPKE — Universität Rostock - Institut für Physik, Rostock (Germany)

X-ray emissions in the keV energy range have shown to be suitable radiation to investigate the properties of laser-created solid-density plasmas [1,2]. A theoretical treatment of spectral line profiles based on a self-consistent ion sphere model is applied on moderately ionized mid-Z materials. We focus here on the influence of plasma polarization effects on the K-line emission energy and satellite transitions due to M-shell ionization and excitation. Titanium and chlorine K_α and K_β spectra were calculated in order to analyze recent measurements with respect to the plasma parameters of electron heated target regions. Radial temperature profiles as well the composition of the created warm dense matter are inferred [3,4].

[1] U. Zastrau, P. Aubert, V. Bernshtam, et al., *submitted to PRL* (2009).

[2] E. Stambulchik, V. Bernshtam, L. Weingarten, et al., *J. Phys. A: Math. Theor.* **42** 214056 (2009).

[3] A. Sengebusch, H. Reinholz, G. Röpke, U. Zastrau, et al., *J. Phys. A: Math. Theor.* **42** 214061 (2009).

[4] A. Sengebusch, H. Reinholz, G. Röpke, *Contrib. Plasma Phys.* **49** 748 (2009).

P 2.11 Mo 17:00 B 305

Effective rate coefficients for charge-exchange recombination spectroscopy of hydrogen-like ions — ●TOBIAS SCHLUMMER¹, OLEKSANDR MARCHUK¹, YURI RALCHENKO², WOLFGANG BIEL¹, and DETLEV REITER¹ — ¹Plasmaphysik, Institut für Energieforschung, FZ Jülich, 52428 Jülich, Germany — ²Physics Division, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20886, USA

For ITER a charge exchange recombination (CX) spectrometer is planned to measure the densities of impurity ions. A neutral H-beam is injected into the plasma. During a CX reaction the beam atom donates its electron to the bare nucleus of the impurity ion. The highly excited state of the resulting H-like ion decays quasi instantaneously emitting characteristic light. The number of emitted photons is directly proportional to the population of excited states. CXRS diagnostics therefore provides one of the most reliable methods for local density measurements of bare nuclei. In this work the intensity of the CX spectral lines is calculated in terms of effective rate coefficients. The data have been obtained for transitions in the visible spectral range using the validated collisional radiative model NOMAD resolved in nl quantum numbers up to n=20. The new set of CX cross-sections was used as a major source of population of excited states. The corresponding populations of the H-like ions and consequently the rate coefficients are calculated by solving the rate balance equations for H-like and bare nucleus ions at the condition of quasi steady state. The rate coefficients have been obtained for impurities of interest like He and Ar as a function of plasma density, temperature and beam energy.

P 2.12 Mo 17:15 B 305

Bolometrie mit Dioden am Tokamak ASDEX Upgrade — ●MATTHIAS BERNERT, THOMAS EICH, CHRISTOPH FUCHS, BERNHARD REITER, ARNE KALLENBACH und ASDEX UPGRADE TEAM — Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 85748 Garching

Strahlungsleistung am Fusionsexperiment ASDEX Upgrade (AUG) wird standardmäßig mit Goldfolien-Bolometern, die Photonenenergien von ca. 1eV bis 8keV abdecken, gemessen. Es stellt eine absolut kalibrierte Messung mit einem Fehler von maximal 5% dar. Die zeitliche Auflösung ist typischerweise auf einige Millisekunden beschränkt.

In AUG wurden 6 neue Bolometer-Lochkameras (insgesamt 192 Sichtstrahlen) mit AXUV-Dioden des Herstellers IRD installiert. Diese Dioden lassen die Strahlungsleistung von Photonen mit 1eV bis 5keV durch einen zur Leistung proportionalen Strom mit einer Zeitauflösung von derzeit 5µs messen.

Im wichtigen VUV-Spektralbereich (6-60eV, d.h. 20-200nm) zeigen die Dioden jedoch eine verringerte Sensitivität. Durch den Vergleich von Tomographien aus Folien- bzw. Diodenmessungen kann man daher Schlüsse über die Verteilung der VUV-Strahlung ziehen.

An einem Experiment wie AUG muss auf Alterungseffekte der Dioden geachtet werden. In mehreren Monaten Betrieb, was mehr als 3000 Plasmassekunden entspricht, wurden jedoch keine zeitlich veränderlichen Effekte durch eine Degeneration festgestellt.

Durch die neue Diagnostik können schnelle transiente Ereignisse wie z.B. ELMs oder Laser Blow Offs orts- und zeitaufgelöst analysiert werden. Erste Ergebnisse hiervon werden vorgestellt.

P 2.13 Mo 17:30 B 305

Überdichte Plasmen am Stellarator WEGA — ●TORSTEN STANGE, HEINRICH PETER LAQUA, MATTHIAS OTTE und STEFAN MARSEN

— MPI für Plasmaphysik, 17491 Greifswald, EURATOM Association
 Zur Temperaturbestimmung als auch zur Heizung von magnetisch eingeschlossenen Plasmen werden Elektron-Zyklotron-Wellen bei der Zyklotron-Frequenz der Elektronen sowie höherer Harmonischer verwendet. Bei speziellen Szenarien zukünftiger Stellaratoren und sphärischer Tokamaks kann jedoch die kritische Plasmadichte (Cut-off-Dichte) erreicht werden, so dass die Propagation der Mikrowellenstrahlung unterbunden wird. In diesen überdichten Plasmen ist aber die Ausbreitung einer elektrostatischen Zyklotron-Welle, der Elektron-Bernstein-Welle (EBW), möglich. Aufgrund eines unteren Dichtelimits (O-mode-cut-off) kann die EBW nur über die Konversion in eine elektromagnetische Welle (BXO) aus dem Plasma ausgekoppelt werden.

Mit Anwendung des umgekehrten Prozesses (OXB) können am Stellarator WEGA überdichte Plasmen in Argon und Helium bei einem Magnetfeld von 0.5 T erzeugt werden. Die zentrale Strahlungstemperatur, indirekt diagnostiziert über die EBW-Emission vom Plasma, liegt in diesem Fall im keV-Bereich. Es wird angenommen, dass durch die kleine Wellenlänge der eingekoppelten 28 GHz-Bernstein-Heizwelle eine äußerst effiziente resonante Heizung und Produktion von hochenergetischen Elektronen im Zentrum erreicht wird. Die Existenz dieser Überthermischen konnte gleichzeitig mit Röntgenmessungen nachgewiesen werden, wohingegen die Bulk-Elektronentemperatur, gemessen mit Langmuir-Sonden, bei einigen 10 eV liegt.

Topical Talk

P 2.14 Mo 17:45 B 305

Trielectronic recombination in highly charged ions —

•CHRISTIAN BEILMANN¹, OCTAVIAN POSTAVARU¹, LODEWIJK ARNTZEN¹, RAINER GINZEL¹, CHRISTOPH H. KEITEL¹, VOLKHARD MÄCKEL¹, PAUL H. MOKLER¹, MARTIN C. SIMON¹, HIRO TAWARA¹, JOACHIM ULLRICH¹, JOSÉ R. CRESPO LÓPEZ-URRUTIA¹, and ZOLTÁN HARMAN^{1,2} — ¹Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, Germany — ²ExtreMe Matter Institute (EMMI), Darmstadt, Germany

The fundamental process of dielectronic recombination (DR) has, beside its relevance for the investigation of the atomic structure, a wealth of applications in plasma diagnostics. In DR, a free electron is captured by the potential of a highly charged ion and its energy is transferred to a bound electron that is excited by that, followed by radiative deexcitation. For plasma diagnostics, DR processes with K-shell excitation of midweight elements are in the focus of interest. Deexcitation of the K-shell by X-ray photon emission is an important plasma cooling mechanism in these cases, since the emitted photons carry away the kinetic energy of the captured electron.

Besides DR there are resonant recombination processes of higher order with the simultaneous excitation of two electrons, the so called trielectronic recombination (TR). Its significant contributions to the total recombination rates makes it necessary to consider these processes in calculations of cooling rates. We present the first measurements of TR with K-shell excitation [1] of Kr, Fe and Ar, carried out in an EBIT, and discuss the TR contributions in dependency of the atomic number.

[1] C. Beilmann, O. Postavaru, et al., PRA 80, 050702(R) (2009)