

## **5**

# **Aktuelle Forschung und Perspektiven**

## **Laufende Projekte 2008**

## 5.1 Plasmatheorie

### AG Plasma- und Energiephysik, Institut für Theoretische Physik

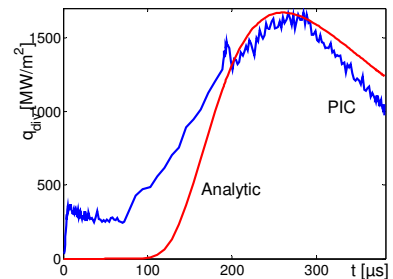
**Leitung:** Ao. Univ.-Prof. Hon.-Prof. Dr. Siegbert Kuhn

**Mitarbeiter:** Dr. Ulrike Holzmüller-Steinacker, Dr. Nikola Jelić, Anton Schneider, Dr. Nikolaus Schupfer, Josef Seebacher, Dr. David Tskhakaya (jun.), Prof. Dr. Davy D. Tskhakaya (sen.)

#### Aktuelle Forschungsthemen:

(1) *Kinetische Untersuchungen der magnetisierten Plasma-Wand-Übergangsschicht (magnetised plasma-wall transition, MPWT) mittels Teilchensimulation*

Dieses Gebiet ist für die Auslegung der ITER-Divertoren sowie für die Formulierung verbesserter Randbedingungen von SOL-Simulationsprogrammen von großer Bedeutung. Speziell werden derzeit mittels Teilchensimulation (PIC-Simulation) die Einflüsse nicht-maxwellischer Teilchenverteilungsfunktionen, von Staubteilchen und von Geometrieeffekten untersucht. Für die nähere Zukunft ist eine voll zweidimensionale Untersuchung der magnetisierten Plasma-Wand-Übergangsschicht geplant. *Abbildung:* Analytisch und aus PIC-Simulationen berechneter Energiefluss auf den äußeren ITER-Divertor [D. Tskhakaya jr., PSI 2008].



(2) *Quasi-zweidimensionale kinetische Untersuchung der Tokamak-Abschälsschicht (SOL)*

Der SOL ist insofern von kritischer Bedeutung, als durch ihn energetische Teilchen aus dem Kernplasma zu den Divertorplatten strömen und sie im Extremfall beschädigen können. In diesem Forschungsvorhaben wird der SOL mittels realistischer Teilchensimulation genau untersucht.

(3) *Umfassende analytische Untersuchung der magnetisierten Plasma-Wand-Übergangsschicht (MPWT)*

Diese Untersuchungen stellen eine unverzichtbare analytische Ergänzung zu den vorwiegend numerischen Untersuchungen von (1) dar. Insbesondere werden hier die Übergangsbereiche zwischen den einzelnen Teilbereichen der MPWT (Debye-Schicht, magnetische Vorschicht und stoßdominierte Vorschicht) genauer als bisher untersucht und die entsprechenden Übergangskriterien (Bohm- bzw. Bohm-Chodura-Kriterium) genauer formuliert. Auch arbeiten wir an einer umfassenden kinetischen Beschreibung der MPWT, die ohne die explizite Aufspaltung in die drei Teilbereiche auskommt.

(4) *Analytische Behandlung der Diffusion von Verunreinigungsionen in einem turbulenten magnetisierten Tokamak-Randschichtplasma*

Anomale (d. h. turbulente) Teilchendiffusion gehört zu den wichtigsten, aber auch schwierigsten Problemen der Fusionsplasmaphysik. Die gegenständlichen Untersuchungen haben bereits zu ersten analytischen Ergebnissen für anomale Diffusionskoeffizienten geführt.

(5) *Untersuchung stark lokalisierter elektrostatischer Strukturen in Plasmen*

Derartige Strukturen umfassen (i) monopolare Schichten an materiellen Begrenzungen sowie (ii) Doppelschichten zwischen aneinander grenzenden Plasmen mit verschiedenen Eigenschaften. Diese Untersuchungen zielen ab auf ein vertieftes Verständnis dieser Strukturen und eine Möglichkeit zur Kontrolle der Plasmaparameter mittels wohldefinierter, absichtlich hergestellter elektrostatischer Strukturen. Derzeit betrachten wir verschiedene Detailspekte dieser Problematik für den Fall eines unmagnetisierten Plasmas. Nach Abschluss dieses Stadiums soll der Fall eines starken magnetischen Feldes senkrecht zum elektrischen Feld untersucht werden. Es soll geklärt werden, ob sich damit die Bildung des wichtigen „Pedestal“-Bereiches am Übergang zwischen Kernplasma und Abschältschicht verstehen lässt.

(6) *Mitwirkung in europäischen Task Forces und Projekten mit Bezug zu Fusionsplasmen*

Wir arbeiten in folgenden Task Forces und Projekten der EU mit: TF Exhaust, TF Transport Topical Group (TTG), TF Integrated Tokamak Modelling (ITM), Distributed European Infrastructure for Supercomputing Applications (DEISA) und EU Fusion for ITER Applications (EUFORIA). In diesen tragen wir zu den entsprechenden Untersuchungen von Fusionsplasmen sowie zur Entwicklung von ITM-Programmpaketen bei.

**Laufende Projekte und Förderungen:**

- *Partial and Integrated Tokamak Modelling.*  
Assoziation EURATOM-ÖAW-Projekt P1. Leitung: S. Kuhn
- *Kinetic studies of magnetised edge plasmas*  
FWF Projekt P19235-N16 (1 Nov. 2006 – 31 Apr. 2009). Leitung: S. Kuhn
- *Localized electrostatic structures in bounded plasmas*  
FWF Projekt P19333-N16 (1.7.2007-31.12.2009). Leitung: N. Jelić

**Wichtige internationale Kooperationen:**

U.C. Berkeley (J. P. Verboncoeur), Ruhr-Universität Bochum (K.-U. Riemann), ITER Cadarache (R. Pitts, A. Loarte), JET Culham (V. Parail, W. Fundamenski), IPP Garching (D. Coster) und Greifswald (R. Schneider), Universität Greifswald, Universität Laibach (J. Duhovnik, R. Gyergyek), EPFL Lausanne (J. Matki, B. Gulejova), Université Paris 13 (X. Bonnin), IPP CZAS Prag. (R. Déjarnac, L. Krllin, R. Panek), AIF Tiflis (V. Berezhiani, N. Shatashvili), NIFS Toki, DEP Torino (F. Subba).

## 5.2 Fusions- und Energiephysik

**AG Plasma- und Energiephysik, Institut für Theoretische Physik**

**Leitung:** Ao.Univ.-Prof. Dr. Klaus Schöpf

**Mitarbeiter:** Dr. Viktor Goloborod'ko, Paul Neururer, Dr. Svyatoslav Reznik, Dr. Viktor Yavorskij, Byeong Ho Cho, Thomas Gassner, Majid Khan

### Aktuelle Forschungsthemen:

#### (1) Simulation energetischer Ionen in JET

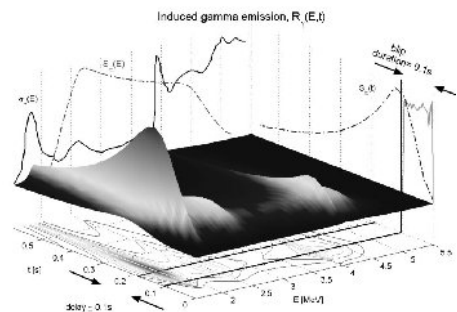
Wir untersuchen die Auswirkung eines periodisch gestörten toroidalen Magnetfeldes auf Transport, Verteilung und Verlust von energetischen Ionen bei Experimenten mit verstärkten Feldrippeln am Joint European Torus (JET). Das Verhalten von energetischen Ionen wird mit unserem 3D COM Fokker-Planck Code modelliert und mit Messergebnissen verglichen. Dabei konnten die verantwortlichen Transportmechanismen identifiziert werden. Das Entstehen energetischer Neutralteilchen und ihr Verluststrom zum Detektor wird modelliert.

#### (2) Prädiktive Modellierung von schnellen Ionen in ITER

Wir modellieren unter Berücksichtigung der spezifischen Geometrie und verschiedener geplanter Betriebsszenarien NBI-Ionen und Fusionsalphas in ITER. Im Rahmen eines Projekts des EFDA Technology Workprogramme, TW6-TPDS-DIADEV2, berechneten wir die entstehenden und relaxierenden Verteilungsfunktionen von NBI-Ionen und Fusionsprodukten sowie durch sie induzierte Transportprozesse und Reaktionen. Durch genaue Analyse konnten neue Methoden zur Diagnostik des Einschlusses schneller Ionen vorgeschlagen werden.

#### (3) Gamma-Diagnostik von energetischen Ionen in verunreinigten Plasmen

Die Verwendung von szintillatorischer Gammastrahlendiagnostik für die tomographische Rekonstruktion von Alphateilchen, die von Fusionen herrühren, oder von durch NBI erzeugten Ionen ist am JET eine vielversprechende Messmethode. Durch Simulation und Berechnung wurde evident, dass sowohl die Intensität der Strahlung als auch die beobachtbare Zeitdifferenz zur Alphaquelle (siehe Abb.) eine Funktion der Plasmaparameter und des Einschlussverhaltens der Alphateilchen sind. Somit erlaubt die Messung den Rückschluss auf die Entweichraten und daher die Qualität des Einschlusses von schnellen Ionen.



#### *(4) Resonanter Transport energetischer Ionen in Tokamaks*

Kleine Störungen des magnetischen und elektrischen Feldes in Tokamaks, z.B. durch Magnetfeldrippel, MHD-Moden oder Radiofrequenzwellen, vergrößern erheblich den radialen Transport von schnellen Ionen zum Plasmarand. MHD-Moden können wiederum durch die energiereichen Ionen selbst induziert werden. Von besonderem Interesse ist das Zusammenwirken der verschiedenen Störungen bei resonanten Wechselwirkungen. Die zeitliche Evolution der Verteilungsfunktion energetischer Ionen in einem JET-Plasma wird mit dem Code 3D COM FP berechnet, wobei ein Kriterium für TAE-Instabilität entwickelt werden soll, mit dem iterativ der die TAE-Aktivität und deren Auswirkung auf die schnellen Ionen erfassende HAGIS-Code (von S. Pinches, Culham) zugeschaltet wird.

#### *(5) Entwicklung eines auf symplektischer Integration basierenden „Orbit Following Codes“ (OFC) für schnelle Ionen und Implementierung am ITM Gateway*

Durch Verwendung der symplektischen Integrationsmethode (SIM) in unserem OFC werden sowohl prompte Erste-Orbit-Verluste und stoßbehaftete Diffusion genau erfasst als auch die resonante Wechselwirkung mit magnetohydrodynamischen Wellen und Instabilitäten. Da bei SIM die resonante Struktur der Ionenbewegung in gestörten Feldern erhalten bleibt, kommt es zu keiner Fehlerakkumulierung, und es können längere Zeitintervalle gewählt werden.

#### **Laufende Projekte und Förderungen:**

- *Tokamak Fast Ion Confinement Based on 3D Fokker-Planck Modelling*,
- Assoziation EURATOM-ÖAW Projekt P4 (seit 2000 laufend).
- *Investigation of Charged Fusion Product Confinement*, ÖAW-BMWuV Forschungsauftrag GZ 4229/1-VIII/A/5/2000 (seit 2000, noch laufend)
- *Assessment of effects of RF- and NBI-generated fast ions on the measurement capability of diagnostics: NBI modelling by Fokker-Planck code*, Projekt TW6-TPDS-DIADEV2 des EURATOM/EFDA Technology Work Programme, Assoziation EURATOM-ÖAW (seit 2006).

#### **Wichtige internationale Kooperationen:**

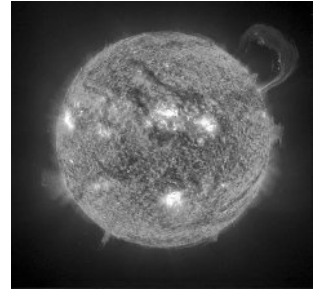
- Kiev Institute for Nuclear Research, Ukrainian Academy of Sciences, Kiev, Ukraine.
- JET/Culham Science Centre, Abingdon, U.K.
- CEA Département de Recherches sur la Fusion Contrôlée, Cadarache, Frankreich.
- Institute for Advanced Energy Systems, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology, Finnland
- Alfvén Laboratory des Royal Institute for Technology, Stockholm, Schweden
- Engineering Physics Department, McMaster University, Hamilton, Kanada

## 5.3 Astro-Plasmaphysik

**Institut für Astro- und Teilchenphysik**

**Leitung:** Ass.-Prof. Dr. Manfred Leubner

**Mitarbeiter:** Dr. Zoltan Vörös, Martin Leitner



### **Aktuelle Forschungsthemen:**

Neben Turbulenz, Intermittenz und Skalierungsrelationen in astrophysikalischen Plasmen beschäftigt sich dieses theoretische Forschungsgebiet auch mit Mechanismen der Teilchenbeschleunigung bis zu relativistischen Energien, und mit Welle-Teilchen Wechselwirkungen als essentiellen physikalischen Prozess, der in der komplexen magnetischen Feldgeometrie von Sonneneruptionen oder extragalaktischen Jets auftritt.

#### *Turbulenz in Weltraumplasmen*

Die Schwierigkeiten Turbulenz zu verstehen, "das letzte ungelöste Problem in klassischer statistischer Mechanik" (nach Feynman), entstehen von der nichtlinearen Wechselwirkung einer großen Zahl von Freiheitsgraden auf vielen Skalen. Hier bedeutet das Wort "groß" riesig oder unendlich, was auch mit herkömmlicher Computertechnik nicht zu erreichen ist. Dieses Projekt konzentriert sich daher auf mindest so signifikante Probleme fundamentaler Bedeutung: Nicht-Lokalität von nichtlinearen Wechselwirkungen in turbulenten Weltraumplasmen.

Nicht-Lokalität wird mit anderen "Negativ-Eigenschaften" assoziiert, die durch die Reichhaltigkeit der räumlich-zeitlichen Bedingungen während der Entstehung von Turbulenz induziert werden. Die Vielfalt an kohärenten Strukturen, an Grenzflächen und Wellen in magnetohydrodynamischen Strömungen mit ihren Wechselwirkungen hindern uns daran adäquate physikalische Gesetze universell anwendbar zu formulieren. Im Gegensatz zur klassischen Kolmogorov Phänomenologie, einer universellen Beschreibung für Turbulenz auf kleinen Skalen, wird die Rolle nicht-lokaler Wechselwirkungen, die zu nicht-universellen Skalierungen und Anisotropie führt, nur langsam in magnetohydrodynamischen Systemen erkannt.

So stellt der Sonnenwind ein hervorragendes Testmedium für statistische Untersuchungen der genannten Negativ-Eigenschaften dar. Nicht-Lokalität kann über spektrale Charakteristiken der Fluktuationen sowie Statistik höherer Ordnung beobachtet werden. Um die besonderen Bedingungen großer Skalen im Sonnenwind identifizieren zu können, werden einfach- und mehrfach-Satelliten Methoden verwendet, um die Robustheit zu prüfen, werden Tests und Abschätzungstechniken eingesetzt. Das Wechselspiel von statistischen Momenten kann Ei-

genschaften von Kopplungen auf verschiedenen Skalen sowie Wechselwirkungen großer Reichweite in der Turbulenz darlegen. Zudem ermöglicht nicht-extensive Thermostatistik ein grundlegendes Verständnis der Physik dieser Wechselwirkungen sowie nicht-lokaler Effekte auf fundamentalem Niveau. Die nicht-extensive Theorie sichert für experimentelle Studien von 'Intermittency' (Energiebursts) im Sonnenwind Unabhängigkeit von a-priori Annahmen. In diesem Konzept wird Intermittency der turbulenten Fluktuationen physikalisch dem nicht-extensiven Charakter des interplanetaren Mediums zugeordnet, wodurch den nicht-lokalen Wechselwirkungen durch Entropieverallgemeinerung Rechnung getragen wird.

Diese Theorie erleichtert auch ein globales Schalenmodell für Turbulenz mit einem definierten Niveau an Nicht-Extensivität zu formulieren. Das ultimativ angestrebte Ziel ist zu verstehen, wie universell das Verhalten in turbulenten Weltraumplasmen ist und insbesondere die Gesetze zu finden, denen diese Plasmaströmungen genügen.

#### *Referenzen:*

- Leubner, M. P., Consequences of entropy bifurcation in non-Maxwellian astrophysical environments, *Nonlin. Proc. Geophys.* 15, 531, 2008.
- Vörös, Z., Zhang, T. L., Leubner, M. P., Volwerk, M., Delva, M., Baumjohann, W. and Kudela, K., Magnetic fluctuations and turbulence in the Venus magnetosheath and wake, *Geophys. Res. Lett.* 35, L11102, 2008.
- Vörös, Z., Zhang, T. L., Leubner, M. P., Volwerk, M., Delva, M. and Baumjohann, W., Venusian wake turbulence, *J. Geophys. Res.*, submitted for publication, 2008.

#### **Laufendes Projekte und Förderungen:**

- *Turbulenz in Weltraumplasmen*, FWF Einzelprojekt P20131 (2007-2011).

#### **Wichtige internationale Kooperationen:**

- University of California, UCLA, Los Angeles, USA
- University of Calabria, Department of Physics, Italy
- Licryl Laboratory, INFN-CNR, Cosenza, Italy
- Institute of Atmospheric Research, Prague, Czech Republic
- Tbilisi State University, Nodia Institute of Geophysics, Tbilisi, Georgia
- Institute of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
- Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, Sweden
- Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami, Japan
- Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Sciences, Kosice, Slovakia

## 5.4 Komplexe Systeme

**Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik**

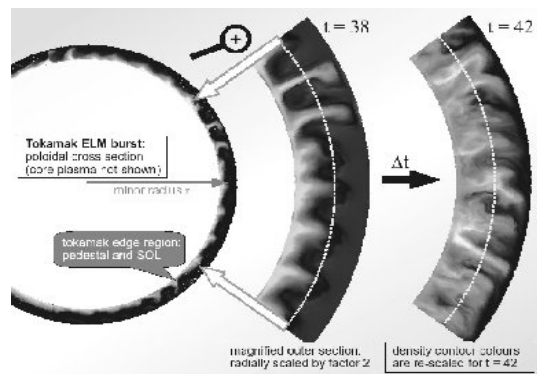
**Leitung:** Priv.-Doz. Dr. Alexander Kendl

**Mitarbeiter:** Felix Gennrich, Stefan Konzett (Inst. für Theor. Physik), Josef Peer

### Aktuelle Forschungsthemen:

#### (1) *Turbulenz und Strukturbildung*

Turbulenz und nichtlineare Strukturbildung bestimmen wesentlich das komplexe Verhalten und den Transport heißer Plasmen in toroidalen Experimenten zur Fusionsforschung mit magnetischem Einschluss. Wir untersuchen hierzu niederfrequente elektromagnetische Fluktuationen und Strukturen in magnetisierten Plasmen durch numerische Simulation mittels lokaler Fluid- und globaler Gyrofluid-Modelle. Unser besonderes Interesse gilt dabei der Wechselwirkung aus (mikroskaligen) turbulenten Wirbeln mit (makroskaligen) zonalen Strömungen und mit am Plasmarand auftretenden (mesoskaligen) ELM-Instabilitäten (siehe Abb.), insbesondere unter dem Einfluss komplexer Magnetfeldgeometrien.



#### (2) *Rechnergestützte Ionen- und Plasmaphysik (High-Performance / Extreme Computing)*

Wir führen numerische Simulationen von komplexen dynamischen Systemen (Ionen, Plasmen und Fluide) auf dem lokalen Rechencluster ("LEO") der Universität Innsbruck und in internationalen Kooperationen auf externen Hochleistungsrechnern durch. Ein "Extreme Computing Award" ermöglicht uns im Rahmen eines EU-Projekts (mit Partnern in Deutschland und Portugal, s.u.) den Zugriff auf extreme Rechenleistungen im Grid-Verbund DEISA von Europäischen Höchstleistungsrechenzentren. Die koordinierte Weiterentwicklung von physikalischen Modellen und numerischen Codes zur Fusionsplasmaphysik sowie deren Verifizierung und Validierung erfolgt im Rahmen der "Task Force on Integrated Tokamak Modelling" der Europäischen Fusions-Entwicklungs-Organisation EFDA. Darüber hinaus beschäftigen wir uns mit der Theorie und Anwendung neuer numerischer Verfahren (Lattice Boltzmann Methode; Gyrokinetik) in benachbarten Disziplinen (z.B. Astrophysik, Geophysik).

### (3) *Analyse und Statistik nichtlinearer Datenreihen aus Simulation und Experiment*

Ein Vergleich zwischen "numerischen" und "realen" Experimenten zu komplexen dynamischen Systemen erfolgt in der Regel durch statistische Methoden und der Analyse von Zeitreihen fluktuierender Daten. Wir beschäftigen uns mit modernen statistischen Verfahren, wie z.B. der Wavelet-Transformation, um Simulationsergebnisse mit Messungen an Fusionsexperimenten wie ASDEX Upgrade (u.a. in Kooperation mit R. Schrittwieser et al. der AG Experimentelle Plasmaphysik) oder Laborexperimenten wie TJ-K (U. Stroth et al, Universität Stuttgart) zu vergleichen und die numerischen Modelle zu validieren. Außerdem gilt unser Interesse der Visualisierung der multiskaligen dreidimensionalen toroidalen Fluktuationsdaten.

### (4) *Theorie biologischer Effekte durch elektromagnetische Blitzimpulse*

Starke Entladungen in Laborplasmen oder in natürlichen Gewitterblitzen erzeugen elektromagnetische Pulse (LEMPs), welche unter bestimmten Umständen zu einer induktiven Reizung des visuellen Kortex ähnlich einer Transkraniellen Magnetstimulation (TMS) und damit verbundenen magnetischen Phosphenen führen können. Wir untersuchen hierzu die Theorie und Modellierung insbesondere des Nahfelds der seltenen langen ( $\sim$  sec) Blitzentladungen sowie mögliche Implikationen für das Verständnis sogenannter "Kugelblitz"-Erscheinungen.

### **Laufende Projekte und Förderungen:**

- *Computational Plasma Dynamics*  
Assoziation EURATOM-ÖAW Projekt P8 (P1-2). Leitung: A. Kendl
- *Extended Computation of Edge Plasma Turbulence*  
FWF Projekt P18760 (2006-2009)  
PI: A. Kendl. Mitarbeiter: S. Konzett. Leitung: S. Kuhn (Institut für Theoretische Physik)
- *Cross-verification of IMP4 codes on specified standard cases*  
EFDA Task Force on Integrated Tokamak Modelling Project ITM-05-IMP4-T2.  
Transnationales EU-Projekt. Leitung: B.D. Scott, IPP Garching, Deutschland.
- *GEM: Large-scale computation of tokamak edge turbulence and transport*  
EU FP6 DEISA Extreme Computing Initiative (DECI) Project (2007-2008).  
Projektleitung: B.D. Scott, IPP Garching. Mitarbeiter: A. Kendl, T. Ribeiro.

### **Wichtige internationale Kooperationen:**

B.D. Scott (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Deutschland); V. Naulin, J.J. Rasmussen et al. (Risø DTU, Dänemark); D. Reiser (FZ Jülich, Deutschland); R.L. Dewar et al. (Australian National University, Canberra, Australien); T. Ribeiro (Centro de Fusão Nuclear, Portugal); U. Stroth et al. (Universität Stuttgart, Deutschland).

## 5.5 Experimentelle Plasmaphysik

**Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik,**

**Leitung:** Ao.Univ.-Prof. Hon.-Prof. Dr. Roman Schrittwieser

**Mitarbeiter:** Dr. Codrina Ionita-Schrittwieser, Christian Maszl,  
Ramona Gstrein, Franz Mehlmann, Ronald Stärz, Patrick Winkler

### Aktuelle Forschungsthemen:

#### (1) *Untersuchung von Turbulenz und Transport in Fusionsplasmen*

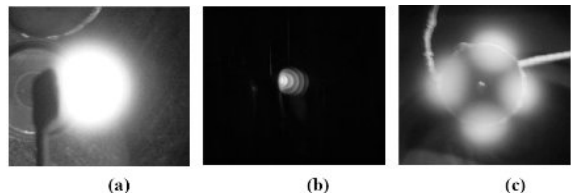
Die Erforschung von Turbulenzphänomenen ist von zentraler Bedeutung für künftige Fusionsexperimente. Im Rahmen des europäischen Fusionsforschungsprogramms arbeitet die Innsbrucker Experimentelle Plasmaphysikgruppe (IEPPG) vor allem mit ASDEX Upgrade am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching zusammen. Mit Hilfe von Anordnungen aus von der IEPPG entwickelten Plasmasonden werden ELMs (Edge Localized Modes) untersucht, die in der Randschicht des Tokamaks zu kurzfristigen starken Ausbrüchen führen. In Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum RFX in Padua und dem Forschungszentrum Risø konnten wir Hinweise darauf finden, wie Typ-I-ELMs sich sowohl radial als auch toroidal bewegen. Eine weitere Zusammenarbeit besteht mit Instituten in Lissabon und Prag.

#### (2) *Plasmasonden für verschiedene Plasmen*

Die IEPPG entwickelt und untersucht komplizierte Sondenanordnungen für die Diagnostik von Fusionsplasmen, mit denen u.a. die Messungen am ASDEX Upgrade, in Lissabon und Prag durchgeführt wurden. Besonders wichtig ist die gleichzeitige Erfassung der Fluktuationen des elektrischen Feldes in verschiedenen Raumrichtungen sowie der Plasmadichte in der Randschichtturbulenz. Mit der in Abb. 3.2.5 gezeigten kombinierten Sonde können zusätzlich magnetische Fluktuationen in allen drei Raumrichtungen gemessen werden. Einen großen Stellenwert nimmt die Untersuchung und Weiterentwicklung von emissiven Sonden ein, die eine genauere Bestimmung des Plasmapotentials ermöglichen als kalte Langmuirsonden.

#### (3) *Komplexe Raumladungsstrukturen*

Das derzeit wichtigste Forschungsthema, das im Innsbrucker Plasmalabor behandelt wird, sind Experimente zu so genannten Feuerbällen in der DP-Maschine. Wenn bei genügend hohem Hintergrunddruck eine kleine zusätzli-



che Anode in das Plasma eingebracht wird und die Vorspannung der Anode das Ionisationspotential überschreitet, so bilden sich davor lokalisierte komplexe Raumladungszonen, die als kugelförmige leuchtende Zonen erscheinen (Abb. a). Diese werden Feuerbälle genannt und zeigen sowohl niederfrequente als auch hochfrequente Instabilitäten und Intermittenz. Unter bestimmten Umständen können sich mehrfache Feuerbälle ergeben (b,c). Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass an der deutlich sichtbaren Begrenzung der Feuerbälle, bzw. bei den "Zwiebelschalen"-Feuerbällen (b) an deren Stufen, Raumladungsdoppelschichten entstehen, in denen das Plasmapotential um den Betrag des Ionisationspotentials springt.

#### (4) Beschichtung mit Hilfe einer Hohlkathodenentladung

Für die Beschichtung von verschiedenen Substraten mit dünnen Schichten werden Plasmareaktoren mit möglichst großem Wirkungsgrad benötigt, wozu meistens Magnetronentladungen verwendet werden. Wegen des Magnetfeldes können in einem Magnetron ferromagnetische Metalle nur schwer verwendet werden. Darum beschäftigt sich die IEPPG in Zusammenarbeit mit der Gruppe Ionenphysik/Nano-Bio-Physik sowie mit der Universität in Iași, Rumänien, seit einigen Jahren mit der Entwicklung einer Sputterquelle, die auch ohne Magnetfeld gute Beschichtungseigenschaften aufweist. Die aussichtsreichste Möglichkeit bietet eine Hohlkathodenentladung, bei der Plasmadichte und Sputterrate auf Grund der besonderen Geometrie sehr hoch sind.

#### Laufende Projekte und Förderungen:

- *Edge plasma turbulence and transport phenomena*, Assoziation EURATOM-ÖAW Projekt P5 (seit 1996 laufend).
- *Investigation and Development of Emissive Probes for Technical Plasma Applications*, FWF-Projekt L302-N02 (2005-2008).
- *Turbulence in the Edge Region of Magnetized Plasmas*, FWF-Projekt P19901-PHY (2008-2011).
- *Applications and diagnostics of electric plasmas*, CEEPUS-Netzwerk AT-0063 mit den Universitäten von Bratislava, Brno, Constanța, Iași, Ljubljana, Novi Sad, Podgorica, Prag und Sofia (seit 2005 laufend).

#### Wichtige internationale Kooperationen:

Fakultät für Physik, Alexandru-Ioan-Cuza-Universität, Iași, Rumänien; Jožef-Stefan-Institut, Universität von Ljubljana; Institut für Plasmaphysik, Tschechischen Akademie der Wissenschaften, Prag; Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Roskilde, Dänemark; Instituto Superior Técnico, Lissabon, Portugal; Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching bei München und Greifswald, Deutschland; Universität von Tromsø, Tromsø, Norwegen.

## 5.6 Ionenphysik / Nano-Bio-Physik

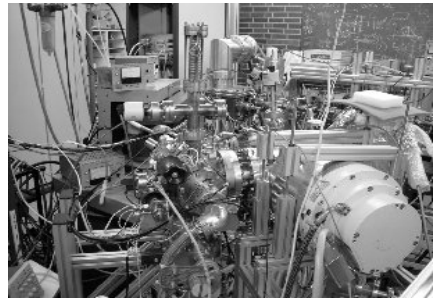
### Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik

**Leitung:** Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c.mult. Tilmann Märk, Univ.-Prof. Dr. Paul Scheier

**Mitarbeiter:** Abid Aleem, Elahe Alizadeh, Ivo Annen, Dr. Stefan Denifl, Achim Edtbauer, Nikolaus Endstrasser, Filipe Ribeiro Ferreira da Silva, Michaela Hager, Dieter Huber, Stefan Jaksch, Christian Kahler, PD Dr. Alexander Kendl, Masoomeh Mahmoodi-Darian, Dr. Christian Mair, PD Dr. Sara Matt-Leubner, Andreas Mauracher, Bilal Rasul, Emanuel Reichsöllner, Harald Schöbel, Radula Stijepovic, Philipp Waldburger, Arntraud Bacher.

### Forschungsthemen im Bereich Plasmaphysik und Fusionsforschung:

Eine der aktuellen Herausforderungen der Fusionsforschung ist die Verträglichkeit von reaktorwertigem Plasma mit plasmabegrenzenden Materialien der ersten Wand. Um die Rolle der Strahlungs- und Stoßprozesse am Plasmarand verstehen und erklären zu können, ist es notwendig, detaillierte und quantitative Kenntnis der entsprechenden elementaren Reaktionen verfügbar zu haben, welche im Volumen vor und an der Wand auftreten. Oberflächenprozesse

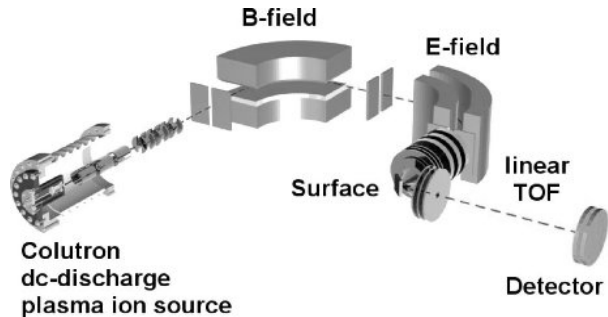


mit Kohlenwasserstoffen und deren Ionen, welche wahrscheinliche Vakuumverunreinigungen in Plasmaapparaten darstellen, und die Rolle von Kohlenwasserstoffchemie und -transport in Divertorplasmen sind einige der Schlüsselkomponenten zur Modellierung und Vorhersage für ITER basierend auf atomaren und molekularen Daten. Verbesserte Datensätze zu Kohlenwasserstoffen und detaillierte und genaue Kenntnis der Wirkungsquerschnitte der relevanten plasmachemischen Volumen- und Wandprozessen werden daher benötigt.

In diesem Zusammenhang führen wir in unserer Arbeitsgruppe durch: Elektronen- (Protonen- und Helium-) Stoßanregungs- und Stoßionisations-Reaktionen mit möglichen Atomen, Molekülen und Ionen am Plasmarand; Bestimmung der relevanten differentiellen, partiellen und totalen Wirkungsquerschnitte und Geschwindigkeitskoeffizienten; Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Ionisationsenergien, Ionisierungsquerschnitte und Elektronenanlagerungsquerschnitte, sowie Berechnung der inelastischen Wechselwirkung zwischen Elektronen und Atomen, Molekülen und Molekülionen. Diese Arbeit unterstützt die Bereitstellung essentieller Daten, welche häufig zu Diagnostik und Modellierung im gesamten Fusionsprogramm benötigt werden.

**Aktuelle Arbeitsgebiete:**

- Ionen-Oberflächen-Stöße durch kleine Kohlenwasserstoffmoleküle auf den fusionsrelevanten Wandmaterialien Graphit, Edelstahl, Beryllium und Wolfram;
- Messung und Berechnung von Elektronstoßquerschnitten von Kohlenstoffverbindungen;
- Reflexionseigenschaften von Kohlenwasserstoffradikalen auf Beryllium und plasma-gespritztem Wolfram;
- Modellierung der Bildung von Beryllium-Wolfram-Verbindungen.

**Laufende Fusionsprojekte:**

- *Electron impact ionization and surface-induced reactions of edge plasma constituents.* Assoziation EURATOM-ÖAW Projekt P6. Leitung: T.D. Märk.
- *Determination of reflection properties of hydrocarbon radicals on Be and plasma-sprayed W for ITER-relevant divertor conditions.* EFDA Task TW6-TPP-CNDMSTICK. Leitung: T.D. Märk
- *Modelling of the formation of BeW compounds in ITER-relevant divertor conditions.* EFDA Task TW6-TPP-BETUNCMOD. Leitung: M. Probst

**Wichtige internationale Kooperationen:**

F. Aumayr et al. (TU Wien); K. Becker (Polytechnic University, Brooklyn, NY, USA); O. Echt (Department of Physics, University of New Hampshire, Durham, NH, USA); B. Farizon, M. Farizon (Institut de Physique Nucléaire de Lyon, Villeurbanne Cedex, France); Z. Herman et al. (J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic); S. Matejcik, J.D. Skalny et al. (Department of Experimental Physics, Comenius University, Bratislava, Slovakia); W. Schustereder et al. (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Euratom-Association, Garching, Germany).

## 5.7 Technologie Dünne Schichten

**Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik**

**Leitung:** Ao.Univ.-Prof. Dr. habil. Hans Pulker

**Mitarbeiter:** Doktoranden: Antje Hallbauer, Daniel Huber, André Murawski, Stefan Schlichtherle, Georg Strauss; Diplomanden: Christian Lux, Ruth Steiger

### Aktuelle Forschungsthemen:

Oberflächen erhalten oftmals erst durch Beschichtungen ihre eigentliche Funktion. Die für die Beschichtungen angewandten Technologien basieren häufig auf Niederdruckplasmen. Diese Plasmen erhöhen nicht nur die chemische Reaktivität bei der Synthese von Verbindungsschichten, sondern beeinflussen durch den Eintrag von vor allem kinetischer Energie in die aufwachsenden Schichten auch deren Struktur und Dichte und damit alle davon abhängigen optischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften.

Ionenplattieren, kathodische Bogenablation und Magnetron-Gasentladungszerstäubung sind solche Prozesse, die von unserer Arbeitsgruppe betrieben und eingehend studiert werden.

Neben der Art des Plasmas (DC, RF, gepulst DC) haben vor allem die Plasmaparameter einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität und Reproduzierbarkeit damit hergestellter Schichten. Die Plasmen sind daher Gegenstand ausführlicher Untersuchungen mittels Massenspektrometrie, Langmuir-Sonden, Faraday-Cups und optischer Spektroskopie.

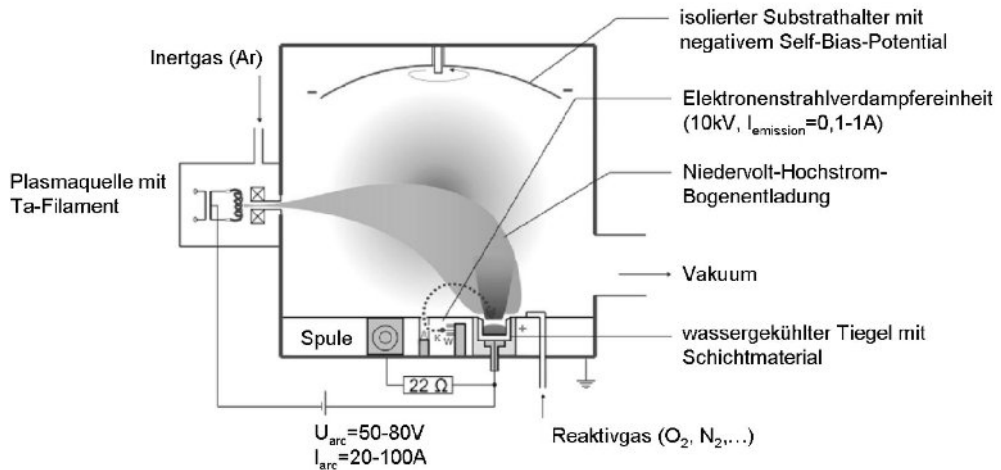


Abb.: Schematische Darstellung des RLVIP-Prozesses (Reactive Low-Voltage Ion Plating)

Die gemessenen Eigenschaften der mit unterschiedlichen Prozessen hergestellten Schichten werden mit den zu ihrer Herstellung benutzten Plasmaparametern korreliert und die Reproduzierbarkeit von Schichteigenschaften / Plasmaparametern evaluiert. Mit den angeführten Plasmaprozessen konnten bislang auf Glas-Substraten Metall-Oxid-Schichten ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ) von höchster Güte hinsichtlich geringster optischer Verluste und hoher Umweltstabilität sowie Metall-Nitrid- und Metall-Carbid-Schichten ( $\text{TiN}$ ,  $\text{CrN}$ ,  $\text{TiC}$ ) mit hohen Härtewerten und besten Haftfestigkeiten auf Stahl reproduzierbar erhalten werden.

Die Arbeiten an Metall-Oxid-Schichten erfolgten teilweise in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena (D) und mit der Firma Dünnschicht Technik GmbH Ing. Hans Tafelmaier in Rosenheim (D).

Wir beschäftigen uns auch mit der Charakterisierung der Flamme eines Flammplasmas (Dusty Plasma) wie es zum Beispiel in modernen Ölheizungen vorkommt. Ziel ist es Korrosions- / Erosions-Phänomene zu studieren und die Verbrennung zu optimieren sowie die Feinstaub-Emissionen herabzusetzen. Diese Arbeiten laufen in Zusammenarbeit mit der Firma swiss e-technic, Mastrils (CH) bzw. deren österreichischer Tochter est in Koblach (A), über ein FFG-Projekt.

Des Weiteren studieren wir die nanotechnologische Präparation von Hölzern mit Silikaten unter Einbeziehung einer Mikrowellen-Behandlung um Brennbarkeit und Pilzbefall zu erniedrigen und die Festigkeit und die Härte des Holzes zu erhöhen. Diese Arbeiten erfolgen in Zusammenarbeit mit den Firmen Linn High Therm, Eschenfelden, und Variotec, Neumarkt (D).

#### **Literatur zu plasmatechnischen Arbeiten:**

(Pulker 2003) N. Kaiser, H.K. Pulker (Hg.), Optical Interference Coatings, Springer Berlin, 2003, ISBN: 978-3540003649

(Strauss 2003) G.N. Strauss, H.K. Pulker, Thin Solid Films **442** (2003) 66-73

(Pulker 2004) H.K. Pulker, S. Schlichtherle, Proceedings of the SPIE - Advances in Optical Thin Films **5250** (2004) 1-11

(Huber 2005) D. Huber, A. Hallbauer, H.K. Pulker, Proceedings of SPIE - Advances in Optical Thin Films II **5963** (2005) 59630G1-59630G9

(Huber 2007) D. Huber, F. Prein, H.K. Pulker, Vak. Forsch. Prax. **19**(2) (2007) 31-35

(Hallbauer 2008) A. Hallbauer, D. Huber, G.N. Strauss, S. Schlichtherle, A. Kunz, H.K. Pulker, Thin Solid Films **516** (2008) 4587-4592

(Pulker 2008) H.K. Pulker, D. Huber, ITO Films Produced by Reactive Low-Voltage Ion Plating, Materials [Umicore] (2008) 14-15

