

## 3.2 Weitere Entwicklung seit 1988 am Institut für Theoretische Physik

**Ao. Univ.-Prof. Hon.-Prof. Dr. Siegbert Kuhn,**  
**Ao. Univ.-Prof. Dr. Klaus Schöpf**  
Arbeitsgruppe Plasma- und Energiephysik,  
Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck

### Einleitung

Im Oktober 1985 wurde am Institut für Theoretische Physik der Universität Innsbruck die „Arbeitsgruppe Physik begrenzter Plasmasysteme (BPSG)“ eingerichtet, der auch Prof. Ferdinand Cap nach seiner Emeritierung (1988) angehörte und die im März 1992 in „Arbeitsgruppe Plasma- und Energiephysik (AG PEP)“ umbenannt wurde. In den 80er und frühen 90er Jahren hatte die Arbeitsgruppe mit einem em. o. Univ.-Prof. (F. Cap) und vier Assistenzprofessoren bzw. Universitätsdozenten (Johann Edenstrasser, Siegbert Kuhn, Manfred Leubner, Klaus Schöpf) ihren Höchststand an Planstellen zu verzeichnen. Hinzu zu zählen ist hier auch der wiss. OR R. Schrittwieser, der eine experimentelle Forschungsgruppe leitete und insbesondere auf dem Gebiet der Doppel- und Randschichten in Q- und DP-Maschinen eng mit uns Theoretikern zusammenarbeitete. 1984 habilitierte sich S. Kuhn für das Fach Theoretische Plasmaphysik, 1989 K. Schöpf für das Fach Energie-, Reaktor- und Fusionsphysik, 1990 R. Schrittwieser für das Fach Experimentelle Plasmaphysik und 2000 J. Edenstrasser für das Fach Theoretische Plasmaphysik. Als Universitätsdozent wechselte Schrittwieser dann aber im Oktober 1990 zum Institut für Ionenphysik, an dem er schon länger das Plasmalabor geleitet hatte. Leiter der Arbeitsgruppe war von 1985 bis 1999 S. Kuhn und von da an bis heute K. Schöpf. Diese Arbeitsgruppe, welche rege Forschungsaktivitäten vorweisen kann und zeitweise um die 20 Mitarbeiter umfasste, unterteilt sich heute in zwei Forschungsgruppen, nämlich in jene für „Plasmatheorie“ (Leiter: Ao. Univ.-Prof. S. Kuhn) und jene für „Fusions- und Energiephysik“ (Leiter: Ao. Univ.-Prof. K. Schöpf).

Einen beklagenswerten Verlust erlitt die AG Plasma- und Energiephysik im Februar 2001, als ihr wertvoller Mitarbeiter Univ.-Doz. Dr. Johann Edenstrasser durch einen tragischen Unfall verstarb.

Ass.-Prof. Dr. M. Leubner, der seine Forschungen auf dem Gebiet der Weltraumplasmaphysik betreibt, ging von 2001 bis 2002 als Gastprofessor und Forscher nach Graz an das Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Nach

seiner Rückkehr an die Universität Innsbruck übersiedelte er von unserem Institut an das damalige Institut für Astrophysik – jetzt Institut für Astro- und Teilchenphysik.

Im Dezember 2003 stieß dann noch Dr. Alexander Kendl zu unserer AG, der vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching zuerst als Marie-Curie-Stipendiat zu S. Kuhn kam und später auch seine weitere Anstellung am Institut für Theoretische Physik durch eigenes Einwerben von Fördermitteln bis zu seiner Habilitation auf dem Gebiet „Theoretische Physik“ im Juni 2007 finanzierte. Anfang 2007 nahm er eine Anstellung bei der Forschungsplattform Informatik & Applied Computing der Universität Innsbruck an und schließlich eine Planstelle am Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, an dem Priv.-Doz. Dr. Kendl im April 2008 seine eigene Arbeitsgruppe „Komplexe Systeme“ gründete.

Entsprechend den Spezialgebieten der einzelnen Dozenten wurden von diesen zahlreiche Diplomarbeiten und Dissertationen betreut, und es entstanden um sie international anerkannte Forschungsgruppen, denen neben den Diplomanden und Doktoranden auch Post-Docs und renommierte Gastwissenschaftler aus verschiedensten Ländern angehör(t)en.



*Abb. 3.2.1: Prof. Dr. Noriyoshi Sato, o.Univ.-Prof. Dr. Ferdinand Cap mit Gattin, Univ.-Doz. Dr. Siegbert Kuhn auf der „International Conference on Plasma Physics“ 1989 in New Delhi, Indien.*

### 3.2.1 Forschungsgruppe Plasmatheorie

**Ao. Univ.-Prof. Hon.-Prof. Dr. Siegbert Kuhn**  
Arbeitsgruppe Plasma- und Energiephysik,  
Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck



#### **Beruflicher Werdegang**

Im Wintersemester 1963/64 begann ich mit dem Studium der Physik und Mathematik an der Universität Innsbruck. Dort absolvierte ich auch vom Wintersemester 1968/69 an mein Doktoratsstudium auf dem Gebiet der Theoretischen Plasmaphysik bei o. Univ.-Prof. Ferdinand Cap am Institut für Theoretische Physik und schloss es im Juli 1972 mit der Promotion ab. Nach Anstellungen als Wissenschaftliche Hilfskraft (1968-71) und als Projektassistent (März 1973 - Dez. 1974) bekleidete ich ab Jänner 1975 eine reguläre Assistentenstelle am Institut für Theoretische Physik. Weitere Eckpfeiler meiner Laufbahn waren ein einjähriger Forschungsaufenthalt bei Prof. C. K. Birdsall und seiner Plasma Theory and Simulation Group (PTSG) an der University of California in Berkeley, U.S.A. (Dez. 1982 - Nov. 1983), die Habilitation (Nov. 1984), die Definitivstellung (April 1985), die Verleihung des Titels „Außerordentlicher Universitätsprofessor“ durch den Bundespräsidenten (Sept. 1992) sowie die Verleihung des Titels „Honorarprofessor“ durch die A.I.Cuza-Universität in Iași, Rumänien (Aug. 2003). Von Okt. 1985 bis März 1999 leitete ich die „Arbeitsgruppe Physik begrenzter Plasmasysteme“, die im März 1992 in „Arbeitsgruppe Plasma- und Energiephysik“ umbenannt wurde. Von Juni 1996 bis Dez. 2002 war ich einer der beiden österreichischen Delegierten im „Fusion Physics Committee (FPC)“ (früherer Name: „Programme Committee (PC)“) der EU in Brüssel, und seit 1998 bin ich Mitglied des International Advisory Committee (IAC) des „International Congress on Plasma Physics (ICPP)“. Seit 1978 war ich kontinuierlich Projektleiter in mehr als 20 Schwerpunkt- und Einzelprojekten. Mein Dank für erwiesene Hilfe und konstruktive Zusammenarbeit gilt allen Kollegen und ehemaligen Lehrern, insbesondere Herrn emer. o. Univ.-Prof. Dr. Ferdinand Cap.

#### **Übersicht Forschung: Integrale Plasmasysteme (IPSe)**

Im Laufe der Jahre habe ich mich mit einer beträchtlichen Anzahl spezieller Probleme bzw. Teilbereiche der Theoretischen Plasmaphysik befasst, die weiter unten aufgelistet sind.

Zusammenfassend sehe ich meinen wichtigsten Beitrag darin, dass ich (seit etwa 1975) das Konzept und die Philosophie des „Integralen Plasmasystems (IPS)“ (wobei ich diese Bezeichnung hier zum ersten Male verwende) kontinuierlich entwickelt, propagiert und wichtigen

Anwendungen zugeführt habe. Im Kern besagt die IPS-Philosophie, dass (i) ein Plasma nie allein, sondern stets als Teil eines umfassenderen dynamischen Systems, dessen sämtliche Komponenten in selbstkonsistenter Wechselwirkung miteinander stehen (eben eines IPS), auftritt und (ii) nur durch solche theoretischen Modelle befriedigend beschrieben werden kann, die diesem integralen Charakter in ausreichendem Maße Rechnung tragen.

Dieses IPS-Konzept habe ich bisher in zwei größeren Bereichen zum Tragen gebracht, nämlich zunächst für den wichtigen Unterfall der „begrenzte Plasmasysteme (BPSe)“ und (seit etwa 1997) im Zusammenhang mit der (vorwiegend numerischen) „integrierten Tokamak-Modellierung und -Simulation (ITMS)“. Weitere Anwendungen des IPS-Konzeptes sind für die nähere Zukunft geplant.

### **Begrenzte Plasmasysteme (BPSe): die Anfänge**

Unter einem „Begrenzten Plasmasystem (BPS)“ verstehen wir ein Integrales Plasmasystem (IPS), das - wie es bei experimentellen oder technischen Plasmaanordnungen häufig der Fall ist - aus (i) dem Plasma selbst, (ii) seinen materiellen Begrenzungen und (iii) den äußeren Schaltkreisen zwischen diesen besteht, und dessen Dynamik durch das integrale und selbstkonsistente Zusammenwirken aller dieser Komponenten bestimmt ist. Demgemäß postuliert die BPS-Philosophie, dass ein theoretisches BPS-Modell konzeptuell durch folgende Gleichungen beschrieben werden muss: (a) (kinetische oder Fluid-) Plasmagleichungen im Volumen, (b) elektromagnetische Feldgleichungen im Volumen, (c) Plasmarandbedingungen und (d) Feldrandbedingungen an den materiellen Begrenzungen sowie (e) Außenkreisgleichungen. Dies steht in grundlegendem Gegensatz zu jenen (vielfach verwendeten) Modellen, die auf der Vorstellung des „unbegrenzten Plasmas (UP)“ beruhen und bei denen die „Plasma-Wand-Außenkreis-Kopplungsgleichungen“ (c) - (e) meist durch einfache Periodizitätsbedingungen o. ä. ersetzt sind. Das von mir über die Jahre angewandte BPS-Konzept ist auf eine große Klasse von experimentellen und technischen Plasmasystemen (Q-Maschinen, Dioden, Beschichtungsentladungen, ...) anwendbar, doch legte mir mein späteres Befassen mit Tokamak-Plasmen eine Erweiterung auf das noch allgemeinere Konzept des „Integralen Plasmasystems (IPS)“ nahe, von dem das BPS ein wichtiger Unterfall ist.

Nach meiner Dissertation kam ich zunächst im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte mit einigen speziellen plasmaphysikalischen Problemen (Plasmaechos, MHD-Generatoren u.a.) in Berührung. Den eigentlichen „Zündfunken“ für meine spätere, von der IPS-Philosophie bestimmte wissenschaftliche Laufbahn lieferten jedoch zwei Plasmaexperimente, die ab etwa Mitte der 1970er Jahre am Institut für Atomphysik der Universität Innsbruck durchgeführt wurden, nämlich ein Hohlkathodenexperiment von V. Giesecke und, etwas später, die Q-Maschinen-Experimente von G. Popa, N. Sato, R. Schrittwieser u. a.

Bei dem genannten Hohlkathodenexperiment [Gieseke, Diss. 1979] wurde die Verteilungsfunktion von aus dem Entladungsraum extrahierten Ionen gemessen, und die theoretische Herausforderung bestand darin, diese Verteilungsfunktion zu berechnen. Im Zuge meiner diesbezüglichen Bemühungen entwickelte ich eine iterative Theorie „begrenzter Schwärme“, wobei unter einem „Schwarm“ Teilchen zu verstehen sind, die sich in einem vorgegebenen Hintergrund bewegen (im Gegensatz zu Plasmen, wo sich die Teilchenkomponenten in gegenseitiger Wechselwirkung entwickeln), und die „Begrenztheit“ durch Randbedingungen an einer materiellen Begrenzung gegeben ist. Festzuhalten ist, dass ich dieses *stoßdominierte begrenzte Schwarmproblem* mit der Methode der „Trajektorienintegration“, also der Integration der kinetischen Gleichung längs ihrer Charakteristiken (d. h., der *stoßfreien* Teilchentrajektorien) gelöst habe [Kuhn 1980]. Damit hatte ich auch bereits ein wichtiges Instrument für die spätere Behandlung *begrenzter Plasmasysteme (BPSe)* zur Verfügung. Bei weiteren - allerdings unbegrenzten - Schwarmproblemen kooperierte ich mit H. R. Skullerud aus Trondheim [Skullerud 1983], einem führenden Wissenschaftler auf diesem Gebiet.

Im Zuge meiner Bemühungen zur theoretischen Klärung dynamischer Phänomene, die seit etwa 1975 an der Innsbrucker Q-Maschine beobachtet wurden, gelangte ich zu der sicheren Erkenntnis und festen Überzeugung, dass die Verwendung des BPS-Konzeptes (im Gegensatz zum UP-Konzept) eine unumgänglich notwendige Voraussetzung für die sachgemäße theoretische Beschreibung realer Plasmasysteme ist. Insbesondere stellte sich ein longitudinales Schwingungsphänomen großer Amplitude, das zunächst aus der UP-Vorstellung heraus als „kohärente stehende ionenakustische Welle“ aufgefasst wurde [Popa 1975, Sato 1976, Popa 1980a, Popa 1980b, Kuhn 1981a, Popa 1982], letztendlich als eine „Potentialrelaxationsschwingung (PRO)“ mit wandernden Doppelschichten und anderen Laufzeiteffekten heraus [Iizuka 1982], wie sie nur unter Zuhilfenahme eines BPS-Modells beschreibbar ist.

Ich möchte hier ausdrücklich feststellen, dass ich diese wichtige *theoretische* Anregung des BPS-Konzeptes (und damit letztlich auch des noch allgemeineren IPS-Konzeptes) vor allem aus genauer Betrachtung und Diskussion *experimenteller* Befunde gewinnen konnte. Dies wiederum war (wie in späteren Fällen auch) nur durch intensive Zusammenarbeit mit den beteiligten experimentellen Plasmaphysikern - insbesondere mit meinem geschätzten Kollegen Roman Schrittwieser - möglich, wofür ich diesen zutiefst dankbar bin.

An dieser Stelle möchte ich auch drei für mich äußerst wertvolle Langzeit-Kooperationen hervorheben, die bereits seit den 1970er Jahren bestehen und seither immer wieder in verschiedenen Zusammenhängen zum Tragen gekommen sind (s. Publikationsliste), nämlich jene mit der Al.-I.-Cuza Universität in Iași, Rumänien (G. Popa u. a.), jene mit der Akademie der Wissenschaften in Tiflis, Georgien (D. D. Tskhakaya (sen.) u. a.) sowie jene mit der Akademie der Wissenschaften in Prag, Tschechische Republik (L. Krlín u. a.).

### **Archetypische begrenzte Plasmasysteme und Berkeley-Kooperation**

Nachdem ich also durch konkrete Experimente zum glühenden Verfechter des BPS-Konzeptes und der zugehörigen Philosophie geworden war, beschloss ich, den Rest meines wissenschaftlichen Lebens der Weiterentwicklung sowie der möglichst weitgehenden Verbreitung und Anwendung dieses Konzeptes (sowie des noch allgemeineren IPS-Konzeptes) zu widmen. Natürlich gab es in der Literatur schon vor meinem Eintritt in dieses Gebiet BPS-Modelle, doch gelang es mir unter anderem, dieses Konzept - neben seiner Weiterentwicklung - durch eine Art „Aufklärungs- und Missionstätigkeit“ weiten Fachkreisen bewusst zu machen und zahlreichen detaillierten Anwendungen zuzuführen, womit ich in dieser Sache weltweit viele Mitstreiter gewinnen und mehrere äußerst fruchtbare Kooperationen eingehen konnte.

Um mit dem - für mich damals noch unbekanntem - grundlegenden dynamischen Verhalten von BPSen vertraut zu werden, suchte ich noch während der oben erwähnten Befassung mit den Innsbrucker Experimenten in der Literatur nach möglichst einfachen, aber doch konzeptuell vollständigen theoretischen BPS-Modellen, und stieß dabei bald auf (a) die „Ein-Emitter-Plasmadiode“ und (b) die „Pierce-Diode“ als „archetypische“ BPS-Modelle. Beide Modelle sind eindimensional und stellen „Dioden“ dar in dem Sinne, dass sie zwei Elektroden - einen Emitter und einen Kollektor - aufweisen, die durch einen äußeren Schaltkreis miteinander verbunden sind. Die Ein-Emitter-Plasmadiode, von deren Emitter thermische Ionen und Elektronen desorbieren, stellt ein einfaches Standard-Modell für thermionische Dioden und Ein-Emitter-Q-Maschinen (wie es auch jene in Innsbruck war) dar. In der Pierce-Diode hingegen bilden die Ionen einen ruhenden, homogenen Hintergrund, und der Emitter sendet einen kalten Elektronenstrahl aus, so dass es sich hier um das einfachste vorstellbare BPS handelt. Beide dieser archetypischen BPS stellen „offene“ Systeme dar, in denen die Energie durch die Wechselwirkung der Teilchen mit den Elektroden sowie durch resistive und/oder Außenkreis-Elemente nicht erhalten bleibt. Daher weisen sie trotz ihrer Einfachheit, die bis zu einem gewissen Grad eine analytische Behandlung zulässt, alle grundlegenden linearen und dynamischen Phänomene offener Systeme auf, also exponentielle und oszillatorische lineare Stabilität und Instabilität sowie nichtlineare Attraktor- und Repellorzustände aller Art.

Ab etwa 1981 suchte ich nach einem geeigneten Ort für ein Forschungsjahr, an dem ich mit diesem Grundwissen über die beiden archetypischen BPS auf offene Ohren und Bereitschaft zur Zusammenarbeit stoßen würde. Meine Wahl fiel schließlich auf die Plasma Theory and Simulation Group (PTSG) an der University of California in Berkeley, deren Leiter, Prof. C. K. Birdsall, schon in früheren Jahren mit mehreren Mitarbeitern grundlegende Arbeiten über Elektronendioden verfasst hatte. Diese Gruppe war außerdem auf Teilchensimulationen

(Particle-in-cell- (PIC)-Simulationen) spezialisiert - damals allerdings nur mit periodischen Randbedingungen, entsprechend der Vorstellung des unbegrenzten Plasmas (UP). Mein Forschungsaufenthalt von Dez. 1982 - Nov. 1983 erwies sich als voller Erfolg: Die Zeit war offenbar reif für die Simulation *begrenzter* Plasmasysteme, meine diesbezüglichen Anregungen und Vorstellungen fielen bei den PIC-Simulationsexperten in Berkeley auf fruchtbaren Boden, und so wurde im März 1983 ein „Plasma Diode Workshop“ (der später aus Gründen der leichteren Förderbarkeit in „Plasma Device Workshop“ umbenannt wurde) abgehalten, als dessen Ergebnis unter der Hauptautorschaft des damaligen Dissertanten William S. Lawson ein erstes BPS-Simulationsprogramm namens „PDW1“, geschrieben in der Programmiersprache Fortran, entstand. Mit diesem wurden in den folgenden Jahren mehrere Simulationen zur nichtlinearen Dynamik der oben beschriebenen archetypischen BPSen durchgeführt. Dankend erwähnen möchte ich in diesem Zusammenhang noch Dr. Thomas L. Crystal, der sich während meines Berkeley-Aufenthaltes um meine Familie und mich sehr gekümmert und auch einige Arbeiten gemeinsam mit mir publiziert hat.

Meine wichtigsten (auch theoretischen) Publikationen sowie die von mir betreuten Dissertationen zu verschiedensten Aspekten des Themas „BPS“ sind: [Kuhn 1984a, Kuhn 1994] (BPSen allgemein), [Kuhn 1979, Kuhn 1981b, Crystal 1991, Kuhn 1994, Pedit Diss. 1993, Pedit 1994, Maier Diss. 1995, Oertl 1996, Ender 1998, Mair 1998] (Ein-Emitter-Plasmadiode) und [Kuhn 1984b, Crystal 1995, Kuhn 1994, Kuhn 1986, Hörhager Diss. 1990, Hörhager 1990, Ender 2005, Kocan 2006a, Kocan 2005b] (Pierce-Diode).

Dazu noch einige Bemerkungen:

- 1.) In mehreren dieser Arbeiten, nämlich [Pedit Diss. 1993, Kuhn 1994, Pedit 1994, Maier Diss. 1995, Ender 1998, Mair 1998], wurde eine weitere Methode zur analytisch-numerischen Behandlung von BPSen entwickelt und angewendet, nämlich die Methode der „Trajektorien-simulation“.
- 2.) Die Arbeiten [Ender 1998, Ender 2005] entstanden in Zusammenarbeit mit Andrey Ya. Ender und Viktor I. Kuznetsov vom Ioffe-Institut in St. Petersburg.
- 3.) Wie die neueren Arbeiten [Ender 2005, Kocan 2006a, Kocan 2005b] zeigen, ist die Pierce-Diode ein „Dauerbrenner“. Zu diesem archetypischen BPS erscheinen immer wieder neue Arbeiten, da es relativ wenig theoretischen bzw. numerischen Aufwand erfordert, aber dennoch weitgehend allgemeingültige Einblicke in die nichtlineare Dynamik von BPSen liefert.

Das 1983 geschaffene BPS-Teilchensimulationsprogramm PDW1 stellte zwar gegenüber den früher verwendeten Programmen mit periodischen Randbedingungen einen wesentlichen wissenschaftlichen Fortschritt dar, es war ihm jedoch aufgrund der Tatsache, dass es in

Fortran geschrieben und somit relativ aufwändig zu handhaben war, keine großräumige Verbreitung beschieden. Dies änderte sich jedoch Anfang der 1990er Jahre, als die Entwicklung der Personalcomputer bereits einen entsprechenden Stand erreicht hatte, dramatisch: Eine neue Generation von Birdsall-Mitarbeitern, allen voran Vahid V. Vahedi und John P. Verboncoeur, adaptierte das Programm PDW1 mit wesentlichen Verbesserungen (insbesondere bezüglich der Benutzerfreundlichkeit) und Erweiterungen (Monte-Carlo-Simulation von Stößen zwischen den Plasmateilchen) und unter Verwendung der Programmiersprache C für PCs und machte es so zu einem leicht handhabbaren, flexiblen Werkzeug. Diese nunmehr als „Berkeley-Codes“ berühmten BPS-Teilchensimulationsprogramme, die es in zahlreichen Versionen (XPDP1, XPDC1, XPDS1, XPDP2, XOOPIC, ...) gibt, werden seit damals wegen ihres realistischen BPS-Grundkonzeptes von hunderten Benutzern weltweit zur Simulation zahlreicher wissenschaftlich und technisch relevanter Plasmasysteme verwendet bzw. weiterentwickelt. Ich kann also guten Gewissens festhalten, dass die von mir im Jahre 1983 in Berkeley zusammen mit den dortigen Kollegen „losgetretene“ Entwicklung der BPS-Teilchensimulation sich als weltweite Erfolgsgeschichte erwiesen hat.

Auch die neueren Arbeiten (seit 1997) *meiner* Forschungsgruppe beruhen zu großen Teilen auf Anwendungen von Berkeley-Codes bzw. Weiterentwicklungen davon: Dr. David Tskhakaya führt stark praxisorientierte Simulationen fusionsrelevanter Plasmen durch, während Dr. Nikola Jelić das Tonks-Langmuir-Plasma zwecks genauer Analyse des Plasma-Schicht-Überganges simuliert. Die Zusammenarbeit mit Berkeley besteht nach wie vor und äußert sich nicht zuletzt in gemeinsam von Berkeley (J. P. Verboncoeur), Innsbruck (S. Kuhn) und Laibach (N. Jelić) veranstalteten Trainings-Workshops für PIC-Simulation. Der letzte derartige Workshop fand im Juni 2007 in Laibach statt, der nächste ist für März 2009 in Innsbruck geplant.

### **Neubeginn und Integrierte Tokamak-Modellierung (ITM)**

Mit dem Beginn der Assoziation EURATOM-ÖAW im November 1998 begann auch für meine Forschungsgruppe (die in der Assoziation mit dem Teilprojekt P1 vertreten ist) insofern eine neue Ära, als die grundlegenden Untersuchungen zu archetypischen Begrenzten Plasmasystemen (BPSen) weitgehend zu Ende gegangen waren und neue Mitarbeiter dazu stießen, die neue, fusionsrelevante Probleme in Angriff nahmen. Die promovierten Mitarbeiter waren bzw. sind

Dr. David Tskhakaya (jun.) (seit Okt. 1997); Dr. Ulrike Holzmüller-Steinacker (seit Sep. 98); Dr. Mladen Stanojević (Juni 99 - Dez. 99); Dr. Fabio Subba (Mai 00 - Feb. 02); Dr. Helmut Pedit (Jan. 03 - Mai 05); Prof. Dr. Davy Tskhakaya (sen.) (seit Apr. 00); Dr. Nikolaus

Schupfer (seit Okt. 01); Dr. Alexander Kendl (Dez. 03 bis März 08); Dr. Nikola Jelić (seit Jan. 04); Dr. Günther Eibl (Okt. 04 - Jan. 06).

Daneben gab bzw. gibt es in meiner Gruppe noch mehrere Dissertanten (s. Kap. 6.3 und 6.4) und Besucher, die aus Platzgründen hier und im Folgenden nicht alle angeführt sind.

Um der Fusionsgemeinschaft meinen Eintritt ins Fusionsprogramm und meine Vorliebe für die IPS-Philosophie nachhaltig ins Bewusstsein zu rufen, richtete ich im Juli 1998 in Innsbruck einen internationalen „Edge Plasma Theory and Simulation Workshop“ mit dem Untertitel „Edge Physics: Integrated Modelling for Fusion and Industrial Plasmas“ aus. Dieser war eine Satellitenkonferenz zur ICPP in Prag und wies ca. 70 Teilnehmer auf.

Der Tokamak, der Hauptgegenstand der damaligen und heutigen Fusionsforschung, ist zweifelsohne ein besonders komplexer Fall eines Integralen Plasmasystems (IPS). Nach meinem Eintritt in die Fusionsforschung 1996 gewann ich jedoch recht bald den Eindruck bzw. die Gewissheit, dass die damals betriebenen Tokamak-Simulationen diesem integralen Charakter keineswegs Rechnung trugen, sondern vielmehr von „regionaler“ Natur waren, d.h. die einzelnen „Regionen“ (Unterbereiche, wie z. B. Kernplasma und Abschältschicht (SOL)) des Tokamak-Plasmas separat und nicht in ihrer gegenseitigen selbstkonsistenten Wechselwirkung behandelten.

Als Delegierter im Brüsseler FPC bzw. PC äußerte ich, wie anhand der damaligen Protokolle belegbar ist, mehrmals die Meinung, dass die Modellierung bzw. Simulation von Tokamak-Plasmen stärker den integralen Charakter des realen Tokamak-Plasmas widerspiegeln müsse, dass es also einer „Integrierten Tokamak-Modellierung (ITM)“ bedürfe. Ferner gelang es mir im April 2001 als Mitglied der EU-Evaluationsgruppe für das ITER-Konzept (genauer: der „Exhaust Subgroup for the EU Assessment of the ITER Final Design Report (FDR): Physics“), diese Ansicht als offizielle Empfehlung im Abschlussdokument zu verankern. Dies trug sicherlich dazu bei, dass ITM offizielle EURATOM-Linie wurde und im Jahre 2003 die „Integrated Tokamak Modelling Task Force (ITM TF)“ entstand. Letztere bestimmt heute den Großteil der europäischen Tokamak-Modellierung, nicht zuletzt auch für ITER. Schließlich ist hier zu erwähnen, dass ich von März 2004 bis Februar 2007 ein FWF-Projekt mit dem Titel „Integrated Tokamak Modelling and Simulation (ITMS) Based on Existing Core and SOL Codes“ leitete, in dem in Kooperation mit erstklassigen internationalen Fachkollegen verschiedene Beiträge zur Vorbereitung der Integration einschlägiger Computerprogramme geleistet wurden.

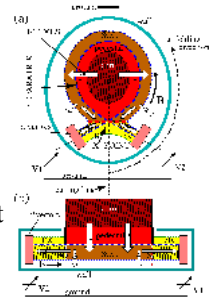
Ich bin also bei allen sich bietenden Gelegenheiten bemüht, die Forschungsaktivitäten meiner Gruppe in der einen oder anderen Weise dem Ziel der ITM nutzbar zu machen.

### Kurzcharakterisierung der derzeitigen tragenden Mitarbeiter der Forschungsgruppe Plasmatheorie (S. Kuhn) und ihrer Arbeitsgebiete:

Im Folgenden sollen aus Platzgründen nur die drei derzeitigen tragenden Mitglieder meiner Forschungsgruppe (in alphabetischer Reihenfolge) sowie ihre wichtigsten Arbeitsgebiete mit Fusionsrelevanz kurz charakterisiert werden. Weitere Einzelheiten über diese und andere Mitarbeiter ergeben sich aus den Titeln und Autoren der zugehörigen Publikationen (Kap. 6.1).

#### Dr. Nikola Jelić:

- PIC-Simulationen und Theorie des Tonks-Langmuir-Modells zwecks genauer Untersuchung des unmagnetisierten Plasma-Schicht-Überganges.
- Untersuchung stark lokalisierter elektrostatischer Strukturen in fusionsrelevanten Plasmen. *Abbildung rechts:* (a) Tokamak-Querschnitt und (b) zugehörige Simulationsgeometrie.
- Kooperationen: U. C. Berkeley (J.P. Verboncoeur), Ruhr-Universität Bochum (K.-U. Riemann), Universität Laibach (J. Duhovnik, R. Gyergyek).

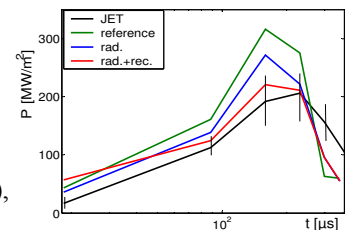


#### Dr. David Tskhakaya (jun.):

- PIC-Simulationen und kinetische Theorie zeitabhängiger Phänomene in der Tokamak-Abschältschicht (SOL).
- Theorie und PIC-Simulation der magnetisierten Plasma-Randschicht.
- Verbesserte Randbedingungen und kinetische Begrenzungsfaktoren für Fluid-Simulationen.
- Entwicklung kinetischer Plasmasimulations-Codes. Mitarbeit in der ITM Task Force zwecks Implementierung der verbesserten Randbedingungen und ITER-Simulationen.
- *Abbildung rechts unten:* Messungen des Energieflusses auf den JET-Divertor (#62221, T. Eich) und zugehörige PIC-Simulationsergebnisse (PSI 2008).
- Habilitation eingereicht.
- Kooperationen: U. C. Berkeley (J. P. Verboncoeur), ITER Cadarache (R. Pitts, A. Loarte), JET Culham (V. Parail, W. Fundamenski), IPP Garching (D. Coster) und Greifswald (R. Schneider), EPFL Lausanne (J. Matki, B. Gulejova), Université Paris 13 (X. Bonnin), IPP Prag (R. Déjarnac, R. Panek), AIF Tiflis (V. Berezhiani), NIFS Toki (Y. Tomita), DEP Torino (F. Subba).

#### Prof. Dr. Davy Tskhakaya (sen.):

- Analytische Theorie des Plasma-Wand-Überganges.
- Analytische Theorie anomalen Transports am Plasmarand.
- Kooperationen: Ruhr-Universität Bochum (K.-U. Riemann), CZAS Prag (L. Krlín), AIF Tiflis (N. Shatashvili).



## 3.2.2 Forschungsgruppe Fusions- und Energiephysik

### **Ao. Univ.-Prof. Dr. Klaus Schöpf**

Arbeitsgruppe Plasma- und Energiephysik,  
Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck

Aufgrund meiner sub-auspiciis-Promotion im Jahre 1975 wurde mir vom damaligen Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung eine ad-personam-Stelle als Universitätsassistent zugesprochen, die ich auf ein Angebot von Prof. Cap hin bei ihm am Institut für Theoretische Physik (ITP) annahm. Ende 1975 noch als von einem Projekt finanzierter Mitarbeiter, trat ich dann mit 1. Jänner 1976 als Assistent bei Prof. Cap meinen Bundesdienst am ITP an. In den ersten Jahren meiner Tätigkeit befasste ich mich vorwiegend mit Energie- und Reaktorphysik, absolvierte 1977 einen zweimonatigen Forschungsaufenthalt am Eidgenössischen Institut für Reaktorforschung der ETH in Würnelingen, Schweiz, sowie einen dreiwöchigen Kurs über Reaktorsicherheit in Harwell in England. Die Expertise auf diesen Gebieten war zur damaligen Zeit besonders gefragt wegen der vielen Debatten und Diskussionen, die wir im Zuge der Errichtung des österreichischen Kernkraftwerkes Zwentendorf sowohl in der Wissenschaftlergemeinschaft als auch für die Politik (im Auftrag des BMWF) und in der Öffentlichkeit zu führen hatten. Aus diesem Kontext heraus entstand 1977 auch meine erste Publikation „Kernspaltungskraftwerk und Umwelt“.



### **Die Zeit von 1978-1986: Fusionsreaktor-konzepte**

Schon bald begannen mich, der ich durch das große Angebot an Vorträgen und Seminaren am ITP natürlich auch mit Plasmaphysik konfrontiert war, wegen des praktisch unerschöpflichen Energiepotenzials die Nutzungsmöglichkeiten der Kernfusion zu interessieren. Gesteigert wurde dieses Interesse im Jahr 1976 durch einen Gastaufenthalt von Prof. Dr. A. A. Harms (damals Konsulent der IAEA für zukünftige nukleare Energiesysteme) von der McMaster University in Hamilton, Kanada, an unserem Institut, der in einem Seminarvortrag die vorteilhaften Leistungsmöglichkeiten von symbiotischen nuklearen Systemen beschrieb, welche auf dem Zusammenwirken von Kernfusions- und Kernspaltungsprozessen basieren. Auf seine Einladung und jene des National Science and Research Council of Canada hin absolvierte ich 1977/78 einen einjährigen Forschungsaufenthalt bei Prof. Harms am Department of Enginee-

ring Physics der McMaster University, in dessen Verlauf ich die plasmaphysikalischen Erfordernisse und das Energiepotenzial von synergetischen Fusions-Fissionsystemen untersuchte. Durch diese Studien ergab sich in Folge auch eine langjährige Zusammenarbeit mit Univ.-Prof. Dr. Manfred Heindler vom ITP der TU Graz und seiner Arbeitsgruppe für Energiephysik, der, ebenfalls initiiert durch einen Forschungsaufenthalt bei Prof. Harms, sich mit der energetischen Bewertung von symbiotischen nuklearen Systemen beschäftigte. In den Jahren 1978/79 war ich zu Vorträgen am ITP der TU Graz eingeladen und konnte dort das Interesse an der plasmatheoretischen Seite der Fusionsphysik wecken. Von da an gab es an der TU Graz regelmäßig Vorlesungen über Plasmatheorie und Fusionsplasmaphysik. Am ITP der Universität Innsbruck wurden in dieser Zeit, neben den obligatorischen Lehrveranstaltungen zur Plasmaphysik, einige Seminarvorträge über verschiedene synergetische Fusions-Fissionsreaktorsysteme (auch Prof. Harms war wieder zu einem Vortrag eingeladen), über neuartige Fusionszyklen und deren Realisierungskriterien, sowie über kinetische Stoßtheorien für Fusionsplasmen gehalten, und eine Diplomarbeit über „Brennstoffdynamik eines hybriden Fusions-Fissionsbrüters“ (Gregor Strasser, 1980) fertiggestellt, bevor ich 1980/81 erneut einen einjährigen Forschungsaufenthalt an der McMaster University in Kanada verbrachte. Eine Großzahl der Forschungsarbeiten aus dieser Zeit beschäftigten sich mit kombinierten Kernenergiesystemen und speziellen Betriebsregime für Fusionsreaktoren. Dabei wurde u.a. die Energetik von Neutralstrahlen getriebenen Deuterium-Fusionsplasmen untersucht, ein seminumerisches Modell zur Berechnung zeitabhängiger Leistungscharakteristiken von Fusions-Fissions-Reaktoren entwickelt und ein auf dem Deuterium-Fusionszyklus beruhendes Konzept für ein dezentrales symbiotisches nukleares Energiesystem vorgeschlagen. Diese Arbeiten fanden auf zahlreichen internationalen Konferenzen Beachtung sowie Anerkennung und wurden in renommierten Fachzeitschriften veröffentlicht, u.a. in *Journal of Nuclear Science and Engineering*, *Nuclear Fusion*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, *Journal of Fusion Energy*, *Nuclear Technology* und *Atomkernenergie*.

Im Jahr 1981 erschien im Teubner-Verlag das Buch „Energieversorgung - Probleme und Ressourcen“ von F. Cap und K. Schöpf, in dem selbstverständlich ein Kapitel auch der „Energie aus Plasma“ gewidmet ist. 1985 stellten zwei Mitarbeiter ihre hier betreuten Diplomarbeiten fertig, nämlich Wilfried Pohl über „Brenndynamik eines Neutralstrahl getriebenen Deuterium-Zyklus mit Berücksichtigung der Fusion schneller Reaktionsprodukte und endlicher Einschusszeiten“ und Emil Hensler über die „Berechnung der Verteilungsfunktion suprathemischer Fusionsprodukte“. Während Herr Pohl mit dem Magisterium sein Physikstudium beendete, begann nun Herr Hensler mit dem Doktoratsstudium. Dieses führte ihn bis 1988 im Rahmen eines Stipendiums durch die Friedrich-Schiedel-Stiftung für Kernfusionsforschung an das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching unter Teilbetreuung durch Prof. Dr. Arnulf Schlüter, dem damaligen Direktor des IPP.

**Die Zeit von 1986-1996:****Suprathermische Teilchen in Fusionsplasmen und Fusionsplasmadynamik**

Das Prinzip eines Fusionsreaktors mit magnetischem Plasmaeinschluss ist, den Fusionsbrennstoff auf Temperaturen von 100-200 Millionen Grad, bei denen er als vollionisiertes Plasma vorliegt, aufzuheizen, damit die Brennstoffionen sich entgegen ihrer elektrischen Abstoßung so nahe kommen, dass ausreichend Kernfusionsreaktionen stattfinden können, und zugleich die Bahnen der Plasmateilchen durch ein kompliziertes Magnetfeld von der Innenwand der Fusionsmaschine fern zu halten. Die Aufheizung eines solchen Plasmas geschieht mit der Einkopplung von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen und/oder durch Einschuss von hochenergetischen Neutralteilchen, die im Plasma ionisiert werden. Durch beide Heizmechanismen werden im Plasma Teilchen erzeugt, die bis zu 100 mal höhere Energien haben als die Teilchen des thermischen Hintergrundplasmas. Sobald dann Fusionen ablaufen, entstehen zudem noch geladene Reaktionsprodukte, die z.B. im Falle des Deuterium-Tritium-Zyklus Energien um das 300-fache der thermischen Energie eines Hintergrundteilchens aufweisen. Es interessiert nun die Entstehungsverteilung sowie der Energie- und Teilchentransport dieser hochenergetischen Plasmakomponenten, die möglichst so lange nicht aus dem Fusionsplasma entweichen sollen bis sie ihre Überschussenergie durch Stöße an die Ionen und Elektronen des Hauptplasmas übertragen haben.

Das Verhalten von energiereichen Teilchen in einem magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasma war und ist praktisch schon seit der Diplomarbeit von Herrn Hensler, in der er die Energieverteilungsfunktion suprathermischer Fusionsprodukte berechnete, ein zentrales Forschungsthema in meiner Forschungsgruppe. Die Aktivitäten wurden in den Folgejahren durch die Zusammenarbeit mit dem ITP der TU Graz verstärkt und halten bis heute an, wobei für uns von besonderem Interesse das Verhalten von hochenergetischen Ionen ist, die durch Neutralteilcheneinschuss, durch das Einkoppeln von elektromagnetischen Wellen und aus Fusionsreaktionen generiert werden. Dieses Spezialgebiet ist von fundamentaler Bedeutung für den Betrieb eines Fusionsreaktors, da die schnellen Teilchen ihre Energie an die Brennstoffionen übertragen sollen, um die geeigneten Reaktionsbedingungen zu schaffen bzw. sie aufrecht zu erhalten. Zu dessen Erforschung wurden Drittmittel eingeworben (BMW-Projekte, Schiedel-Stiftung, Forschungsprojekt ÖNB, Impulsprojekt 1+2, EURATOM-ÖAW), damit Gastforscher, Postdocs, Dissertanten und Diplomanden beschäftigt werden konnten.

In den Jahren der intensiven Kollaboration mit der TU Graz war ich von 1985-1999 ständiger Lektor und Institutsmitglied am ITP der TU Graz, im Sommersemester 1992 dort sogar Gastprofessor. Ich hielt während dieser Zeit regelmäßig Vorlesungszyklen über Fusionsplasma-physik, über Kinetische Plasmatheorie und allgemein über Energiephysik. Daneben wurden

in enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedern von Prof. Heindlers AG für Energiephysik am ITP der TU Graz in vom BMWF und der Friedrich-Schiedel-Stiftung geförderten Forschungsprojekten die Verteilungen der Entstehungsgeschwindigkeiten von Reaktionsprodukten aus Fusionen zwischen beliebig verteilten Reaktionspartnern untersucht sowie ihre Transporteigenschaften unter Berücksichtigung von Stößen mit diskreten großen Energieüberträgen wie bei der elastischen Kernstreuung, wofür eine modifizierte Boltzmann-Fokker-Planck Gleichung entwickelt wurde.

Im Jahr 1989 habilitierte ich mich an der Universität Innsbruck für die Fächer Reaktorphysik, Fusions- und Energiephysik und wurde definitiv gestellt als Dozent am Institut für Theoretische Physik. Eine Folge der Zusammenarbeit mit der TU Graz war die Gründung eines von 1989-1994 jährlich veranstalteten internationalen Workshops in Plasmaphysik (IWPP) in Pichl bei Schladming, der vorwiegend von den Grazer Kollegen, jedoch 1991 auch von unserer AG Plasmaphysik organisiert wurde. (Siehe dazu das Buch „Current Research on Fusion, Laboratory and Astrophysical Plasmas“ von S. Kuhn, K. Schöpf und R. Schrittwieser, das 1993 bei World Scientific erschienen ist.) Der Workshop diente anfangs dem Zweck, alle österreichischen Physiker in Diskussionen über ihre Forschungen zusammen zu führen, welche sich mit Plasmaphysik beschäftigten. Die Arbeiten zur Plasmaphysik nahmen damals im Zuge der österreichischen Kooperationsüberlegungen auf dem Gebiet Fusionsforschung von Jahr zu Jahr immer mehr zu. Später entstand aus dem Workshop zusätzlich eine Winter-school mit bis zu 100 Teilnehmern, auf der international bekannte Plasmaphysiker vortrugen.

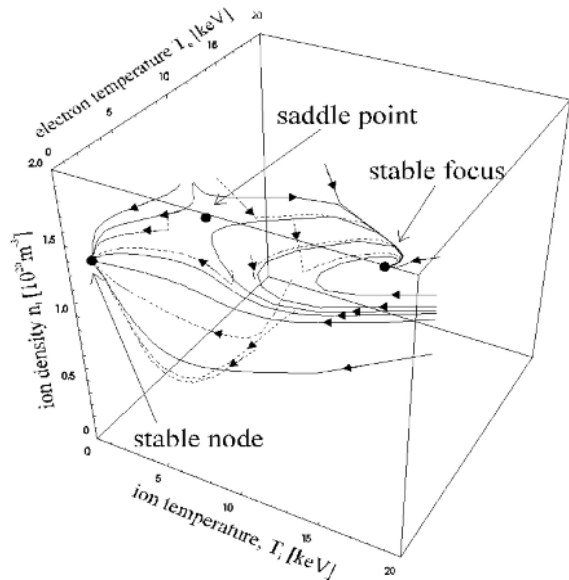
1991 erhielt ich die Einladung zu einem Aufenthalt als Visiting Professor am Institut für Kernenergieforschung in Obninsk, Russland, sowie zu einem Vortrag an der Technischen Universität Moskau. In Obninsk lernte ich Dr. Viktor Sosnin kennen, den ich dann 1992 für ein Jahr als Post-Doc an unser Institut einlud. In seinen Forschungsarbeiten widmete er sich hier der Reaktionskinetik in der Myonen-katalysierten Fusion, die oft auch als Niedrigtemperatur-fusion bezeichnet wird und auf der resonanten Bildung von Myon-Molekülen in einem Deuterium-Tritium-Gemisch bei Temperaturen um bzw. unter 1000 Kelvin beruht. Da die Produktion von Myonen jedoch energieaufwändiger ist als der Energiegewinn aus den durch sie katalysierten Fusionsreaktionen, ist dieses Fusionskonzept nur im Kontext eines hybriden Reaktorsystems denkbar.

Ein weiteres Projekt, welches vom Jubiläumsfonds der Österreichischen Nationalbank gefördert wurde, war die Berechnung von Quellverteilungen von Reaktionsprodukten aus Beam-Target-Fusionen, in dessen Rahmen 1994 an unserem Institut in Innsbruck auch die Diplomarbeit von Michael Winter über „Winkelabhängiges Quellenergiespektrum für Fusionsprodukte aus Beam-Target-Reaktionen verschiedener Fusionsbrennstoffe“ entstand.

Eine nach wie vor intensive Forschungskooperation, die sich nun immer mehr auf die Gebiete der Dynamik nuklearer Reaktionsketten und der Fusionskinetik bezog, gab es mit Prof. Harms und seiner Gruppe an der McMaster University in Hamilton, Kanada, wo ich in den Jahren 1986-1996 mehrmals Forschungsaufenthalte verbrachte. Eine Folge dieser ständigen wissenschaftlichen Kontakte war dann meine Berufung als Adjunct Associate Professor am Department of Engineering Physics der McMaster University von 1993-1999. Im Verlaufe dieser Tätigkeit, die ich neben meinem Hauptberuf als Dozent an der Universität ausübte, betreute ich auch Studenten von der McMaster University bei ihren Master- und Doktorarbeiten. So kamen Dave Kingdon und Wojtich Fundamenski im SS 1993 an unser Institut, um die nötigen plasmaphysikalischen Kenntnisse für ihre Studien zu erwerben. Dr. Kingdon ist heute Wissenschaftsprojektmanager bei der kanadischen Energieversorgungsgesellschaft Ontario Hydro und Dr. Fundamenski ist wissenschaftlicher Leiter der Task Force E (Exhaust: removal of heat and particles) beim Europäischen Fusionsexperiment JET in Culham.

Basierend auf unseren früheren Arbeiten zu den Entstehungsenergieverteilungen und zur Transporttheorie suprathemischer Teilchen begann ab 1993 unsere Forschungsgruppe, der mittlerweile ein Post-Doc, ein Dissertant und zwei Diplomanden angehörten, die nichtlinearen Effekte in der Energie- und Teilchendynamik eines brennenden Fusionsplasmas zu untersuchen. Dafür konnte ich von 1994-1996 über die ÖAW vom BMWF im Rahmen des Forschungsauftrages „Globale Brenndynamik von D-T Fusionsplasmen“ ausreichend Fördermittel einwerben, um meine Projektmitarbeiter entsprechend anstellen zu können. In diesem Projekt wurde die Dynamik der in einem magnetisch eingeschlossenen, fusionierenden Plasma ablaufenden Reaktionen und Prozesse in ihren globalen Auswirkungen, nämlich jenen, die dann makroskopisch den Fusionsreaktorbetrieb und seine Steuerung bestimmen, in einem Echtzeit-Simulationsmodell erfasst. In Abb. 3.2.2.1 wird dazu die Entwicklung der Plasmadichte und Ionen- wie Elektronentemperatur des Plasmas während des Fusionsbrennens dargestellt. Unsere reaktordynamische Betrachtung lieferte eine völlig neue Erkenntnis bezüglich der Zündung. In Folge der nichtlinearen Dynamik eines brennenden Fusionsplasmas verliert die herkömmliche statische Zündungsdefinition ihre Bedeutung und muss durch das Kriterium der dynamischen Zündung ersetzt werden. Ist das Plasma dynamisch gezündet, entwickelt es sich von selbst zum stabilen Arbeitspunkt. Auf dieser Grundlage konnte ein optimaler Pfad mit minimaler externer Heizenergie bis zur Zündung gefunden werden. Diese richtungweisenden Resultate für den Betrieb zukünftiger Fusionsreaktoren wurden auf internationalen Konferenzen präsentiert und in mehreren Fachzeitschriften publiziert, u.a. 1996 in den renommierten *Annals of Nuclear Energy*. Im Zuge unserer damaligen Forschungen wurden 1993 von Bernhard Heuschneider die Diplomarbeit „Zweidimensionale Fusionsdynamik von Tokamakplasmen“ und 1994 von Thomas Hladschik die Dissertation „Reaktorphysikalische Untersuchungen zur ITER-Fusionsdynamik“ fertig gestellt.

Abb. 3.2.2.1: Von Ionendichte und Plasmatemperaturen aufgespannter Zustandsraum der DT-Fusionsbrenndynamik. Abhängig von den gewählten Anfangsbedingungen entwickelt sich das Fusionsplasma unter dem Einfluss von neutraler Brennstoffinjektion und den verschiedenen Teilchen- und Energieverlustmechanismen sowie der internen Alphaheizung entlang der jeweiligen Zustandstrajektorie, wenn keine externe Zusatzheizung angewendet wird.



1995 bahnte Kollege Dr. Johann Edenstrasser erstmals eine Zusammenarbeit mit Drs. Andrushchenko, Goloborod'ko und Yavorskij vom Kiev Institute for Nuclear Research (KINR) in der Ukraine an, die sich als äußerst erfolgreiche Forschungskoooperation herausstellen sollte. Es wurden dabei spezielle Probleme der Plasmatransporttheorie erforscht und gemeinsam neuartige Theorien und Modelle veröffentlicht. Auch heute noch gibt es ein intensives Zusammenarbeiten mit dieser Gruppe, wobei Dr. Goloborod'ko und Dr. Yavorskij seit dem Jahr 2000 wertvolle, ständige Mitarbeiter meiner Forschungsgruppe Fusions- und Energiephysik sind.

### Die Zeit von 1997 bis heute: Modellierung von schnellen Ionen in JET und ITER

Nachdem Ende 1996 Österreich einen Assoziationsvertrag zwischen der ÖAW und EURATOM zur Beteiligung an der europäischen Fusionsforschung abgeschlossen hatte, war die Möglichkeit gegeben, dass EU-Förderungsmittel in fusionsrelevante österreichische Forschungsprojekte einfließen. Schon ab dem Jahr 1997 wurden die Arbeiten der Innsbrucker Plasmatheoriegruppe im Rahmen von drei Physikprojekten der Assoziation EURATOM-ÖAW gefördert, je einem für die Gruppe S. Kuhn, die Gruppe J. Edenstrasser und meine Forschungsgruppe. Diese Projekte wurden und werden in enger Kollaboration mit anderen europäischen Fusionsforschungseinrichtungen durchgeführt, wie z.B. JET Culham Science

Centre, MPI Garching, Risø Kopenhagen, CEA Cadarache und dem Kiev Institute for Nuclear Research.

Im WS 1997/98 hatten wir Prof. Dr. Sümer Sahin als Gastprofessor zu Besuch, der damals Dekan der Technischen Fakultät an der Gazi Universität in Ankara war und uns eine sehr interessante Vorlesung über Fusionstechnologie hielt. Zu ihm besteht auch heute noch wissenschaftlicher Kontakt.

Ein langjähriges Projekt, das gemeinsam mit Prof. Harms sowie Dave Kingdon von der McMaster University in Kanada und mit Prof. George Miley von der Urbana University of Illinois, USA, verfolgt wurde, war das Verfassen eines Lehrbuches über die Physik der Kernfusion. Es konnte im Jahr 2000 mit der Veröffentlichung des Buches „Principles of Fusion Energy“ abgeschlossen werden, das von der World Scientific Publ. Co. nach wie vor als „best selling textbook“ angepriesen wird und heuer wieder in eine Neuauflage gegangen ist.

Im Mai 2000 habilitierte sich Kollege Johann Edenstrasser zum Dozenten für Theoretische Physik. Das Hauptinteresse in Prof. Edenstrassers Forschungsarbeiten galt der Beschreibung des Transportverhaltens in magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasmen, wofür er die einzelnen Transportprozesse mit Hilfe verschiedener Zeitskalen untersuchte. Durch einen tragischen Unfall verstarb Prof. Edenstrasser am 4. Februar 2001 leider viel zu früh. Obwohl wir mit seinen Mitarbeitern, von denen Dr. Ulrike Steinacker-Holzmüller dann einige Monate aus meinen Projektmitteln in meiner Gruppe angestellt war, noch zwei von ihm initiierte Arbeiten über „Transportkoeffizienten eines Fusionsplasmas auf einer mittleren Zeitskala“ und „Einfluss der Larmor-Gyration auf Transportphänomene in toroidalen Plasmen mit schwacher Stoßwechselwirkung“ fertigstellten, konnten seine weiteren interessanten Forschungspläne wegen Personalmangels nicht mehr verwirklicht werden.

Im Verlauf der Jahre 2000-2002 waren Dr. Zhanna Andrushchenko und ihr Gatte Dr. Oleg Silivra als Gastwissenschaftler über Fördermittel zu den ÖAW/BMWF Impulsprojekten „Charged Fusion Product Confinement in JET“ sowie „Investigation of Charged Fusion Product Confinement“ in meiner Gruppe angestellt. Während Dr. Andrushchenko an der Ursache für die Ausbildung von zonalen Strömungen in Plasmen forschte, untersuchte Dr. Silivra die Kopplung von toroidalen und poloidalen Alfvén Eigenmoden in Fusionsplasmen.

Von 2000 an spezialisierte sich meine Forschungsgruppe auf die numerische Simulation von schnellen Teilchen in Fusionsplasmen mit toroidaler Magnetfeldkonfiguration, wie sie in den zur Zeit größten Tokamaks und Stellaratoren und später auch in ITER vorkommen. Um solche Magnetfelder an jedem Punkt der Plasmageometrie genau zu erfassen, wurde von uns ein viel beachtetes Modell entwickelt (veröffentlicht 2000 in PPCF), das eine analytische Darstellung der Gleichgewichtskonfiguration der magnetischen Flussflächen in verschiedenen

Fusionsmaschinen gestattet. Durch diesen analytischen Ausdruck für das Magnetfeld konnte mit Hilfe eines von Dr. Goloborod'ko entwickelten Fokker-Planck-Codes die Verteilungsfunktion schneller Teilchen numerisch berechnet werden. Unsere rechnerischen Resultate wurden auf frühere und gegenwärtige Experimente bezogen, wobei exzellente Übereinstimmung mit den Messergebnissen festzustellen ist. Es gelang uns, bis dahin ungeklärte, beobachtete Effekte physikalisch zu interpretieren und zu erklären bzw. noch unbekannte Transporteffekte und deren Diagnostikmöglichkeiten vorherzusagen, wie z.B. die Effekte von magnetischen Rippeln in Folge der endlichen Zahl von toroidalen Magnetspulen oder von Resonanzen in der Ionenbewegung mit kleinen regulären örtlichen oder zeitlichen Störungen des magnetischen oder der elektrischen Feldes.

Besonderes Interesse hatten wir auch an den Auswirkungen spezieller Plasmastromprofile wie z.B. durch ein „Current hole“ auf die Bahnen, die Verteilung und den Einschluss von schnellen Ionen. Auf diesem Gebiet wurde von Paul Neururer im Jahr 2004 eine ausgezeichnete Diplomarbeit „Fast ion orbits and distribution in current hole tokamak magnetic configurations“ verfasst und 2001 von Byeong Ho Cho, einem Masterstudiumabsolventen vom namhaften Korean Institute of Science and Technology (KIST) in Seoul die Dissertation „Flux surface shape effects on alpha particle orbits in noncircular tokamaks“ begonnen.

Mittlerweile modellieren wir das zeitabhängige Verhalten energetischer Ionen ständig für Experimente in JET. Seit 2006, als wir am EFDA Projekt DIADEV2 über die Effekte von schnellen Ionen in ITER teilnahmen, betreiben wir so genanntes prediktives Modellieren von energetischen Teilchen, die durch Neutralstrahleinschuss (Neutral beam injection, NBI), Radiofrequenzheizung und aus Fusionsreaktionen in ITER entstehen werden. Wir benutzen dafür sowohl Monte Carlo Codes wie auch den hier entwickelten 3D COM Fokker-Planck Code. Unsere Gruppe lieferte dabei mit der Berechnung der genauen Entstehungsverteilungsfunktion von durch NBI erzeugten Ionen im Plasma den Input auch für andere Forschungsinstitute in Europa, z.B. CEA Cadarache, Culham Science Centre und das Advanced Energy Systems Institute an der Helsinki University of Technology (TEKES Assoziation), welche mit Simulationsprogrammen ebenfalls das Verhalten schneller Ionen in ITER untersuchen. In unseren Simulationen konnten die Dichteprofile der bei DT-Fusionen entstehenden Alphateilchen, des von ihnen so genannten „bootstrap“-Stromes sowie der Fusionsenergie deposition im Plasma, die Verlustflüsse von energetischen Teilchen aus dem Plasma und die thermische Wandbelastung in ITER bestimmt werden.

Illustrative Beispiele unserer diesbezüglichen Resultate für das „steady state“ ITER-Betriebsszenario Nr. 4 mit internen Transportbarrieren sind in den poloidalen Querschnitten der Abbildung 3.2.2.2 gezeigt.

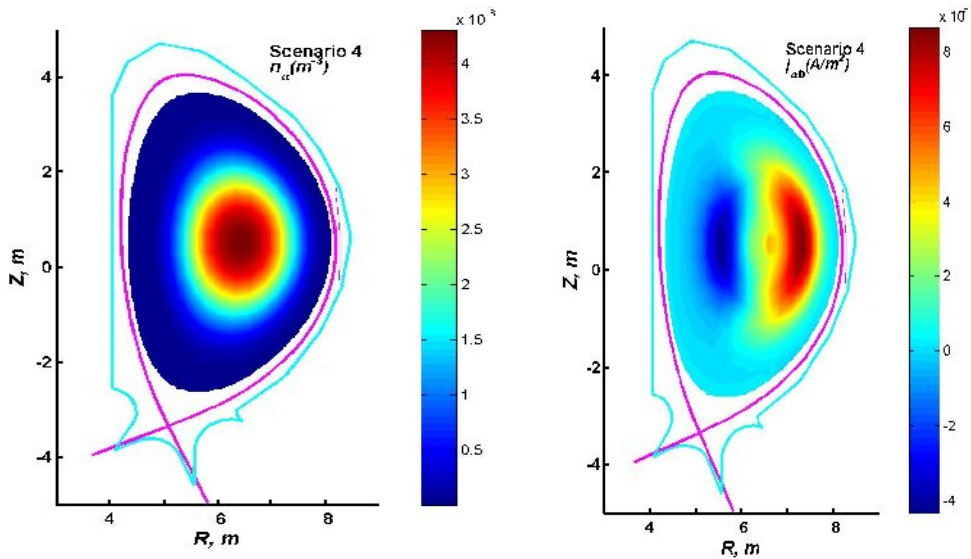


Abb. 3.2.2.2: Links: Dichteverteilung von DT-Alphas in der poloidalen Querschnittsebene von ITER. Rechts: Dichteprofil des durch schnelle Alphateilchen erzeugten „Bootstrap“ Stroms im ITER-Fusionsplasma.

Von Oktober 2006 bis Juni 2007 besuchte uns als Gastforscher Dr. Mohsen Zahran vom Physics Department der Mansoura Universität in Ägypten. Er konfrontierte uns mit einem neuartigen Konzept zur Beschreibung von Transportphänomenen, nämlich mit fraktionierten kinetischen Gleichungen. Initiiert durch einen seiner Seminarvorträge hat Thomas Gassner seine hervorragende Diplomarbeit „Fractional Kinetic Equations in Plasma Physics“ verfasst.

Derzeit hat die Forschungsgruppe Schöpf neben ihrem Leiter sechs Mitarbeiter. Während Dr. Yavorskij sich auf die analytische Modellierung plasmaphysikalischer Probleme spezialisiert hat, ist Dr. Goloborodko ein versierter Programmierer und für die Ausführung der numerischen Simulationen zuständig. Mathematische Unterstützung kommt von Dr. Svyatoslav Reznik vom Kiev Institute for Nuclear Research, der zu Forschungsaufenthalten ans ITP kommt. Weiters sind drei Dissertanten, B.H. Cho, Thomas Gassner und Majid Khan damit beschäftigt, eigene Rechencodes zu erstellen, um die Bewegung, Bahnen, Transporteigenschaften und Geschwindigkeitsverteilungen von schnellen Ionen sowie die Interaktion mit MHD-Störungen zu simulieren. In all diesen Arbeiten wird großer Wert auf die Kollaboration mit anderen europäischen Institutionen gelegt, vorwiegend mit solchen, die einschlägige Experimente ausführen, an welchen wir unsere Ergebnisse validieren können.

### **Forschungsaktivitäten zur Energiephysik**

Neben den vielen reaktorphysikalischen Studien, die sich sowohl auf Spaltungs- wie auch Fusionssysteme und deren kombinierten Betrieb bezogen, waren ebenso nichtnukleare Fragen und spezielle Probleme aus dem weit umfassenden Bereich Energiephysik Gegenstand unserer Untersuchungen. Hierbei wurden mathematisch-physikalische Grundlagen formuliert und Simulationsmodelle für technische Prozesse erstellt.

So wurde z.B. 1995/96 im Rahmen eines von der Kammer der gewerblichen Wirtschaft in Tirol geförderten Projekts und in Kooperation mit einem deutschen Ingenieurbüro (Steierwald, Schönharting & Partner GmbH in München und Stuttgart) ein fluiddynamisches Modell zur Verkehrsflusssimulation entwickelt, in das aufgrund von Instrumentarien zur Bewertung von Verkehrssituationen Zielfunktionale integriert wurden. Das Modell war in gewisser Beziehung Vorreiter für heutige Verkehrsleitsysteme, deren Steuerung Kriterien wie Schadstoffausstoß, Kraftstoffminimierung oder Minimum von Bremsvorgängen u.ä. zu Grunde liegen. Über diese Thematik hat im Jahr 1996 Hannes Sailer seine Diplomarbeit „Fluiddynamische Modellierung des Verkehrsablaufes auf Fernstraßen - Physikalische Grundlagen und numerische Fallbeispiele“ geschrieben und später noch einige Jahre auf diesem Gebiet numerische Modelle erstellt, u.a. zur Simulation des Verkehrszustandes in komplexen Stadtverkehrsnetzen im Rahmen des Deutschen Forschungsprojektes „Straßenverkehrsanwendungen der Nichtlinearen Dynamik“.

Ein anderes interessantes Arbeitsfeld, nämlich die Bestimmung der Effektivität der Tageslichtleitung in metallisch verspiegelten wie auch in mit Prismenfolien ausgekleideten Lichtrohren, ergab sich durch die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg in Deutschland. Im Rahmen der 1998 fertig gestellten Diplomarbeit „Physikalische Grundlagen des Lichttransports in Prismen-Lichtrohren unter besonderer Berücksichtigung der Tageslichtnutzung“ hat Karlheinz Eder aufgrund von theoretischen Überlegungen wie auch praktischen Erkenntnissen eine Grundgleichung für den Lichttransmissionswirkungsgrad von Prismen-Lichtrohren hergeleitet. Die theoretisch berechneten Transmissionsgrade wurden dann mit Lichtstrommessungen an einem experimentellen Versuchsaufbau verglichen, der von Eder am ISE Freiburg errichtet wurde. Die daraus gewonnenen Resultate trugen wesentlich zur heutigen Auslegung und Anwendung von Lichtrohrsystemen bei. Zum Beispiel beruhte die vom ISE Freiburg vorgenommene Planung der „Light pipes“ für die Tageslicht-Beleuchtung des damals neuen U-Bahnhofes am Potsdamer Platz in Berlin zum Großteil auf unseren Berechnungen und Herrn Eders Messungen.

Auch auf dem Gebiet der Solarenergienutzung wurde laufend Forschung betrieben, die sich meistens mit der Effizienz und der Energieernte von Solaranlagen befasste. Ein erwähnenswertes Projekt, ebenfalls in Kooperation mit dem Fraunhofer ISE in Freiburg waren die theo-

retischen und experimentellen Untersuchungen zur Diffusion von Übergangsmetallen in der Barrierschicht von Silizium-Dünnschichtsolarzellen. Ein zentrales Bemühen in der Entwicklung einer kostengünstigen kristallinen Silizium-Dünnschichtsolarzelle mit dennoch akzeptablem Wirkungsgrad ist das Finden einer geeigneten Barrierschicht hin zum billigen und daher weniger reinen Trägermaterial. Wir haben nun die Wirkung solcher Barrierschichten, in denen Diffusionsprozesse äußerst langsam ablaufen, auf den den Solarzellenwirkungsgrad beträchtlich reduzierenden Transport verschiedener Verunreinigungselemente vom Trägermaterial bis in die dünne aktive kristalline Siliziumschicht bestimmt. Dafür wurde 1998/99 von Johannes Aschaber einerseits ein mehrere gekoppelte Differenzialgleichungen umfassendes Diffusionsmodell für metallische Verunreinigungen in Barriere-Schichtsystemen erstellt und numerisch gelöst. Andererseits wurden am ISE Freiburg geeignete Probenstrukturen entwickelt und hinsichtlich ihrer Fremdstoffkonzentration experimentell vermessen. Die Ergebnisse der Untersuchungen hat Aschaber 1999 in seiner Diplomarbeit „Diffusion von Übergangsmetallen in plasmadeponierten SiO<sub>2</sub>- und SiN-Barrierschichten bei der kristallinen Silicium-Dünnschichtsolarzelle“ veröffentlicht.

In Zusammenarbeit mit der Tiroler Wasserkraftwerke AG (TIWAG) erstellten wir im Zeitraum 2000/01 ein auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten für den detaillierten Wasserdurchfluss basierendes dynamisches Simulationsmodell einer Wasserkraftanlage, mit welchem das Inselbetriebsverhalten, d.h. bei Abtrennung vom Stromnetz, bei unterschiedlichen, zum Teil extremen Betriebszuständen vorhergesagt werden kann. Zu Vergleichszwecken wurden die Anlagendaten des Kraftwerks Achensee zu Grunde gelegt und an diesem zur Parameteranpassung Messungen bei unterschiedlichen Lastfällen durchgeführt. Das hier von Markus Strasser in seiner Diplomarbeit „Simulation des Wasserflusses durch die einzelnen Module eines Wasserkraftwerkes“ entwickelte Modell, das letztlich der TIWAG überlassen und auch schon für ein italienisches Kraftwerk verwendet wurde, berechnet den Rohrbahndruck, die Ausbildung von Druckwellen sowie die Energiehöhenchwankungen im Wasserschloss, bestimmt die leistungsabhängige Düsenstellung bzw. die Stellung des Leitapparates einer Turbine, errechnet den Wirkungsgrad und liefert Kriterien für den optimalen Maschineneinsatz.

Ebenfalls ein Gemeinschaftsprojekt mit der TIWAG war 2003-2004 die numerische Modellierung von Tunnelluftströmungen mit unterschiedlichen Lüftungssystemen, wobei die Einflüsse der Fahrzeuge im Verkehrsraum auf die Lüftungskanäle und schließlich auch einer einen Autobrand simulierenden örtlich konzentrierten Wärmequelle mitberücksichtigt wurden. Die Simulation, welche Josef Seebacher im Rahmen seiner Diplomarbeit „Simulation instationärer Luftströmungen in Straßentunnels“ ausarbeitete, läuft schneller als in Echtzeit und erlaubt es daher, die Auswirkungen von Lüftungsmaßnahmen im Falle eines Fahrzeugbrandes prädictiv zu modellieren, wodurch falsche Maßnahmen, wie sie z.B. bei der Katastrophe im Mont-Blanc-Tunnel passierten, von vornherein ausgeschlossen werden können. ■