

**50 Jahre
Plasmaphysik und Fusionsforschung
an der Universität Innsbruck
1958 - 2008**

A. Kendl (Hg.)

Inhalt

1	Vorwort des Vizerektors für Forschung	<i>(Tilman Märk)</i>	7
2	Grußworte		11
3	Geschichte der Plasmaphysik in Innsbruck		17
3.1	Die Anfänge der Plasmaphysik in Innsbruck ab 1958	<i>(Ferdinand Cap)</i>	19
3.2	Weitere Entwicklung seit 1988 am Institut für Theoretische Physik		31
3.2.1	Plasmatheorie	<i>(Siegbert Kuhn)</i>	33
3.2.2	Fusions- und Energiephysik	<i>(Klaus Schöpf)</i>	41
3.3	Plasmaphysik am Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik		53
3.3.1	Ionenphysik und Angewandte Physik	<i>(Tilman Märk)</i>	53
3.3.2	Experimentelle Plasmaphysik	<i>(Roman Schrittwieser)</i>	63
3.3.3	Komplexe Systeme	<i>(Alexander Kendl)</i>	76
4	Wissenschaft im Kontext		79
4.1	1958-2008: 50 Jahre Fusionsforschung für den Frieden	<i>(Karl Lackner)</i>	81
4.2	Europäische Fusionsforschung in Österreich: Die Assoziation EURATOM-ÖAW an der Österreichischen Akademie der Wissenschaften	<i>(Harald W. Weber)</i>	94
4.3	Ionen- und Plasmaphysik / Angewandte Physik: ein Schwerpunkt der Physik	<i>(Paul Scheier)</i>	100
5	Aktuelle Forschung und Perspektiven: Laufende Projekte 2008		107
6	Publikationen der Innsbrucker Plasmaphysiker		123
7	Nachdruck: Scientific Report No. 100 „17 Years Plasma Physics in Innsbruck“		167

1

50 Jahre Plasmaphysik Innsbruck

Vorwort aus der Sicht des Vizerektors für Forschung

Als erstsemestriger Physikstudent im Jahre 1962 hatte man keine sehr große Auswahl an Vorlesungen, es gab verschiedene Mathematikvorlesungen und es gab die eine eher experimentell ausgerichtete Einführungsvorlesung für alle Physik- und Medizinstudenten von Professor Steinmaurer. Es gab zu dieser Zeit nur einen einzigen anderen Physikprofessor, den Theoretiker Professor Ferdinand Cap. Er las damals einen mehrjährigen Zyklus aus theoretischer Physik und je nachdem, wann man gerade mit dem Studium anfang, musste man einige Zeit warten um gerade den Anfang, nach entsprechenden vorbereitenden Vorlesungen aus Mathematik und Experimentalphysik, nämlich die Vorlesung Mechanik I zu erwischen. In meinem Falle hätte das bedeutet, dass ich mindestens zwei Jahre hätte warten müssen und so entschloss ich mich entgegen allen Ratschlägen mich bereits im ersten Semester in die mit Ehrfurcht als sehr schwierig gehandelten theoretischen Vorlesungen zu setzen. Ich habe von Anfang an jede einzelne Vorlesung genossen, Professor Cap hat es als begnadeter Vortragender verstanden auch die schwierigsten Zusammenhänge und mathematischen Ableitungen in klarer, verständlicher und spannender Weise vorzutragen. Der einzige Wermutstropfen, man musste unheimlich schnell und viel mitschreiben. In seinen Spezialvorlesungen zur Plasmaphysik hat er in einer Reihe von Schülern in diesen Jahren das Interesse und die Liebe zur diesem hochaktuellen Forschungsgebiet der modernen Physik geweckt.

Prof. Cap war bereits in den 60er Jahren ein moderner, extrem aktiver Professor, er beschränkte sich nicht nur auf die Vorlesungstätigkeit, sondern er führte eine aktive Forschungsgruppe auf dem Gebiet der Plasmaphysik, publizierte bereits viel mehr als andere und

schrieb nebenbei noch Bücher. Besonders erwähnenswert, in einer beispiellosen Modernität, überwand er die damals und auch teilweise heute noch im europäischen Raum in der Physik vorherrschende Trennung zwischen Theorie und Experiment und gründete ein eigenes experimentelles Labor und initiierte als Theoretiker erfolgreiche Experimente im Bereich der Plasmaphysik. Heute ist es eine Selbstverständlichkeit, dass man Fragestellungen in der Physik mit beiden Methoden zugleich behandeln muss, wenn man erfolgreich sein will.

Er war auch in anderer Beziehung seiner Zeit voraus, wir reden heute davon wie wichtig Wissenstransfer von der Universität in die Wirtschaft ist, Prof. Cap hat bereits in den 60er Jahren Erfindungen realisiert und Patente angemeldet. Er war auch zusammen mit Professor Maximilian Pahl, vom Institut für Atomphysik (Ionenphysik) die treibende Kraft dafür, dass nach Installierung des Schwerpunktprogrammes des FWF aufgrund eines hervorragenden Antrages einer der ersten Schwerpunkte nach Innsbruck vergeben wurde, wobei im Rahmen dieses Schwerpunktes auf dem Gebiet der Plasmaphysik auch junge Assistenten Projektleiter sein konnten, was damals üblicherweise Professoren vorbehalten war. Die Förderung der Plasmaphysik in Innsbruck durch dieses Schwerpunktprogramm in den beiden Förderperioden 1973-1978 und 1978-1983 führten zu einem enormen Aufschwung der Plasmaphysik, im speziellen der Fusionsforschung, in Innsbruck und im speziellen der experimentellen Gruppen am Institut für Atomphysik (Ionenphysik). Dieser Aufschwung fand seine Fortsetzung in der Innsbrucker Teilnahme an der von Professor Hannspeter Winter in den 90er Jahren initiierten Assoziation Euratom-ÖAW (heute unter der Leitung von Professor Harald Weber), in der fünf von den acht österreichischen Physikprojekten in Innsbruck angesiedelt sind. Mit dem Baubeschluss von ITER in Europa ist nunmehr sichergestellt, dass Fusionsforschung auf europäischer und internationaler Ebene in den nächsten Jahrzehnten einen wesentlichen Schwerpunkt bilden wird. Insofern ist es auch wichtig sicherzustellen, dass auch in Österreich adäquate Forschungs- und Lehrkapazitäten zur Verfügung stehen. Der Standort Innsbruck nimmt in diesem Zusammenhang aus Sicht des Wissenschaftsministeriums, der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und von EURATOM, Brüssel, eine Schlüsselrolle auf dem Gebiet der theoretischen Plasmaphysik und der experimentellen Ionen- und Plasmaphysik ein.

Wenn heute die Physik Innsbruck eines der ganz großen Glanzlichter der LFUI darstellt und international hohes Ansehen genießt, wenn heute Innsbruck und auch Österreich auf der internationalen Landkarte der Plasmaforschung prominent vertreten ist (u.a. durch den LFUI Schwerpunkt Ionen- und Plasmaphysik / Angewandte Physik), dann verdanken wir dies den Visionen von Professor Cap und Professor Pahl. Diese beiden Professoren haben in den schwierigen Nachkriegszeiten den Grundstein zu dieser rasanten Entwicklung gelegt. In einem einzigen Punkt hat sich allerdings Professor Cap geirrt, schon in den Vorlesungen, die ich als junger Student anfangs der 60er besuchte und in denen er uns von dem vierten Materiezustand berichtete und überzeugte, hat er uns damit fasziniert, dass es nur mehr ein kurzer

Schritt bis zur Realisierung des Fusionsreaktors sei. Aus seiner damaligen Sicht hätte der Schritt vielleicht 10-20 Jahre dauern sollen, wie wir heute wissen, könnten daraus eher 50-100 Jahre werden.

Als Vizerektor für Forschung der Leopold-Franzens-Universität wünsche ich mir und der Plasmaphysik Innsbruck auch für die nächsten 50 Jahre eine ebenso erfolgreiche Entwicklung wie in den bisherigen 50 Jahren. Neben der Quantenphysik und der Astrophysik ist dieser Teilbereich der Physik das dritte wesentliche Standbein, auf dem die internationalen Erfolge und Anerkennung der Innsbrucker Physik beruhen.



Univ.-Prof. Dr.phil. Dr.h.c. mult. Tilmann Märk
Vizerektor für Forschung, Universität Innsbruck

2

Grußworte

2.1 Grußwort

Univ.-Prof. Dr. Karlheinz Töchterle

Rektor der Universität Innsbruck



Die Plasmaphysik und Fusionsforschung ist nun bereits seit 50 Jahren ein wichtiges Arbeitsgebiet der Physik an der Universität Innsbruck. Ferdinand Cap, seit 1958 Professor für theoretische Physik und einer der Gründerväter der österreichischen Plasmaforschung, hat sich frühzeitig und gegen manche Widrigkeiten für die Beteiligung österreichischer Forscherinnen und Forscher an der internationalen Fusionsforschung stark gemacht. Ziel war unter anderem bereits damals die friedliche Nutzung der Kernverschmelzung zur Energiegewinnung. Ein Forschungsfeld, das mit dem internationalen Forschungsprojekt ITER zum Bau eines Versuchsreaktors für die großtechnische Nutzung der Kernfusion gerade heute wieder hochaktuell geworden ist. Innsbrucker Forscher sind mit eigenen Experimenten und Simulationen an vielen großen Fusionsanlagen weltweit beteiligt und arbeiten auch an theoretischen und numerischen Modellierungen für ITER mit.

Die Mitglieder der Innsbrucker Plasmaphysikgruppe haben in den vergangenen Jahrzehnten im engen Austausch mit internationalen Partnern in Ost und West anerkannte Beiträge auf den Gebieten der Plasmatheorie, der Plasma-Wand-Wechselwirkung und der Plasmadiagnostik geleistet. Sie zeichneten aber auch für die Anfänge des wissenschaftlichen Hochleistungsrechnens in Innsbruck verantwortlich.

In der Mitte des vergangenen Jahrhunderts entstand in Innsbruck rund um die Nobelpreisträger Victor F. Hess und Erwin Schrödinger sowie den Quantentheoretiker Arthur March ein internationales Zentrum der Physik. Auf diesen Fundamenten konnte Ferdinand Cap als Assistent von Schrödinger und Nachfolger von March aufbauen und Innsbruck als international beachtete Forschungsstätte der Physik etablieren. Gemeinsam mit den erfolgreichen Arbeitsgruppen der Ionenphysik, der Quantenphysik und der Astrophysik trägt die Plasmaphysik auch heute wesentlich zum Ruf des Physikstandortes Innsbruck bei. Als Rektor möchte ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu diesem Erfolg gratulieren und ihnen im Namen der Universität für den großen Einsatz und das nicht nachlassende Engagement danken.

2.2 Grußwort

Ao. Univ.-Prof. Dr. Helmut Ritsch

Leiter des Instituts für Theoretische Physik



Seit Beginn meines Studiums 1980 konnte ich mehr als die Hälfte der erfolgreichen 50-jährigen Geschichte der Plasmaphysik in Innsbruck aus den unterschiedlichsten Perspektiven hautnah miterleben. Prof. Ferdinand Cap hatte ja als einer der Ersten die Bedeutung der öffentlichkeitswirksamen Präsentation moderner Forschungsergebnisse in Massenmedien jenseits von Fachzeitschriften und Kongressen erkannt und die Faszination wissenschaftlicher Forschung einem breiten Publikum vermittelt. Dies hat auch meine Entscheidung, hier in Innsbruck Physik zu studieren stark beeinflusst. Obwohl ich dann die Quantenoptik als Spezialgebiet wählte, konnte ich am Institut immer die neuesten Erkenntnisse und Fortschritte der Plasmaphysik in zahlreichen Seminaren, Gastvorlesungen und Vorträgen internationaler Experten aus erster Hand mitverfolgen.

Die Theorie der Kernfusion erschien vielen damals fast vollständig geklärt und deren praktische Implementation zu einer unerschöpflichen Energiequelle lediglich eine Aufgabe für gewitzte Ingenieure und Techniker, die insbesondere in Zusammenarbeit mit den gerade neu entstehenden Möglichkeiten der Computersimulation alle Hindernisse dorthin bald aus dem Weg geräumt haben würden. Wie so oft in der Geschichte der Physik fand man aber bei genauerem Hinsehen bald eine faszinierende Fülle von unerwarteten und spannenden neuen Herausforderungen auf diesem Weg. So blieb, man ist fast versucht zu sagen glücklicherweise, auch der theoretischen Plasmaphysik bis heute ein spannendes, lohnendes und kreatives Arbeitsfeld. Es ist besonders erfreulich, dass es dem, im Vergleich zu manchen Großforschungseinrichtungen kleinen Innsbrucker Theoretikerteam um die Kollegen Siegbert Kuhn, Klaus Schöpf und zuletzt auch Alexander Kendl, immer wieder gelingt, auf diesem kompetitiven Gebiet international beachtete Beiträge zu liefern und neue Akzente zu setzen, die jetzt auch in die neueste Generation von Kernfusionreaktoren wie ITER in Frankreich einfließen.

Ich möchte hier allen beteiligten Innsbrucker Forschern aufs herzlichste zu diesem runden Jubiläum gratulieren und ihnen weiterhin solche Erfolge in ihrer vielfach auch über die Fusionsplasmaphysik weit hinaus gehenden Forschungstätigkeit wünschen.

2.3 Grußwort



Univ.-Prof. Dr. Paul Scheier

Leiter des Instituts für Ionenphysik und Angewandte Physik

Die Plasmaphysik in Innsbruck blickt nun schon auf eine 50-jährige Geschichte zurück. Damit wurde dieses Gebiet in Innsbruck noch vor München erforscht, wo heute zweifellos mit dem IPP Garching eines der weltweit größten Zentren für Plasmaphysik angesiedelt ist. Seit der Gründung durch Prof. Ferdinand Cap wurden Fragestellungen sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht. Ein langjähriger Forschungsschwerpunkt, finanziert vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, stellte dazu die notwendigen Geldmittel zur Verfügung. Seit 1996 wird speziell fusionsrelevante Forschung von der Assoziation Euratom-ÖAW der Österreichischen Akademie der Wissenschaften unterstützt. Von acht österreichischen Projekten sind fünf in Innsbruck angesiedelt.

Plasmaphysik ist ein wesentlicher Bestandteil eines der drei Forschungsschwerpunkte der Innsbrucker Physik (Astro- und Teilchenphysik, Quantenphysik, sowie Ionen- und Plasmaphysik / Angewandte Physik). Weiters sind durch den Bau des Forschungsreaktors ITER in Cadarache und durch die Energiekrise Bedingungen geschaffen worden, die ein weltweites Interesse an Plasmaphysik für die nächsten Jahrzehnte sichern.

Als Leiter des Instituts für Ionenphysik und Angewandte Physik und als Sprecher des Schwerpunkts Ionen- und Plasmaphysik / Angewandte Physik hoffe ich auf viele Beiträge aus Innsbruck und wünsche der Innsbrucker Plasmaphysik alles Beste für die anstehenden Entwicklungen und die kommenden 50 Jahre.

2.4 Grußwort



Univ.-Prof. Dr. Sabine Schindler

Leiterin des Instituts für Astro- und Teilchenphysik,
Leiterin der Forschungsplattform Informatik & Applied Computing

Plasmaphysik ist eine wichtige Grundlagenwissenschaft für alle Bereiche der Astrophysik, denn die Objekte und Gase im Weltraum bestehen hauptsächlich aus Plasmen ganz verschiedener Art, z.B. Plasmen mit sehr hoher Dichte im Inneren von Sternen oder äußerst dünne Plasmen im intergalaktischen Raum. Am Institut für Astro- und Teilchenphysik der Universität Innsbruck gibt es daher auch eine eigene Arbeitsgruppe Astro-Plasmaphysik. Eine weitere Arbeitsgruppe des Instituts beschäftigt sich mit magnetohydrodynamischen Modellen von Plasmen in Galaxien und Galaxienhaufen.

Als Leiterin der Forschungsplattform Informatik & Applied Computing schätze ich auch die rege Teilnahme der Plasmaphysiker an den Aktivitäten zum Hochleistungsrechnen der Universität Innsbruck. Diese Aktivitäten haben eine lange Vorgeschichte: so war der erste Innsbrucker Doktorand der Plasmaphysik gleichzeitig der erste Hochleistungsrechner-Anwender mit numerischen Rechnungen auf einer Zuse Z11 des Tiroler Landesvermessungsamts. Wenig später beschaffte der Plasmaphysiker Ferdinand Cap für die Universität Innsbruck die erste eigene Rechenmaschine - eine Zuse Z22.

Ich gratuliere den Plasmaphysikern an der Universität Innsbruck zu 50 erfolgreichen Jahren und hoffe auf viele konstruktive Zusammenarbeiten in der Zukunft sowohl im Bereich Astrophysik als auch im Bereich Hochleistungsrechnen.

3

Geschichte der Plasmaphysik in Innsbruck



em. o. Univ.-Prof. Ferdinand Cap (* 25.6.1924):
Begründer der Plasmaphysik und Fusionsforschung
an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck

3.1 Die Anfänge der Plasmaphysik in Innsbruck ab 1958

em. o. Univ.-Prof. Dr. Ferdinand Cap

Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck

Prolog: die Geschichte des Instituts für Theoretische Physik bis 1958

Als sich in der Mitte des 19. Jahrhunderts in Österreich durch Wiener und Grazer Wissenschaftler internationaler Bedeutung (Stefan, Mach, Boltzmann) die Bedeutung der theoretischen Physik (damals oft noch als mathematische Physik bezeichnet) herausstellte, beschloss die Innsbrucker Philosophische Fakultät, zunächst ein Ordinariat und dann ein Institut für mathematische Physik zu schaffen. Auf Antrag des zuständigen Ministeriums und mit kaiserlicher Entschließung vom 12. Juni 1868 wurde Ferdinand Peche zum ersten Ordinarius der mathematischen Physik in Innsbruck ernannt. Ferdinand Peche (1820-1898) hatte an den Universitäten Prag und Wien studiert und erwarb im Oktober 1851 die Lehrbefähigung für Physik und Mathematik am Gymnasium. 1851 und 1853 hatte er sich vergeblich um die damals vakanten Lehrkanzeln für Physik bzw. Mathematik in Innsbruck beworben. Da er damals noch nicht habilitiert war, wurde er nicht in Betracht gezogen. Am 12. April 1854 habilitierte er sich als Privatdozent für analytische Physik und Mechanik an der Grazer Philosophischen Fakultät, und als er bei der physikalischen Lehrkanzel am Joanneum in Graz ebenfalls nicht zum Zuge kam, wurde er am 29. Juli 1864 zum Direktor der Oberrealschule in Rakovac (Kroatien) ernannt.

Leider hat sich Peche in seiner Innsbrucker Zeit (1868 - 1889) publizistisch nur wenig hervorgetan. Er veröffentlichte Arbeiten über die Integration elliptischer Funktionen, weiters über die Auflösung von Gleichungen dritten Grades und schließlich über die Integration elliptischer Funktionen in geschlossener Form. Nach Meinung des deutschen Hochschulmanachs kam er damit kaum über das Niveau eines heutigen Mittelschullehrbuches hinaus. In der eigentlichen theoretischen Physik liegen von ihm keine Publikationen vor. Allerdings muss bemerkt werden, dass ihm in Innsbruck keinerlei eigene Räumlichkeiten oder andere Hilfsmittel zur Verfügung standen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Fakultät zunächst überlegte, die mathematische Physik wieder aufzulassen und an Stelle dieses Ordinariates ein Ordinariat für Geometrie zu beantragen. Es gelang jedoch in einer entscheidenden Fakultätsitzung vom 20. Jänner 1890 eine knappe Mehrheit für die Beibehaltung der Lehrkanzel mathematische Physik zu erreichen. Der an das Ministerium geschickte Besetzungsvorschlag um-

fasste primo loco Ottokar Tumlirz, secundo loco Engelbert Kobald und tertio loco Anton Wassmuth. Mit kaiserlicher EntschlieÙung vom 29. Juli 1890 erfolgte die Ernennung von Wassmuth zum Ordinarius für mathematische Physik in Innsbruck mit der Verpflichtung, jedes Semester fünf Wochenstunden auf dem Gesamtgebiet der mathematischen Physik und jedes dritte Semester ein Collegium publicum über Spezialgebiete zu lesen. Es scheint, dass Boltzmann und Mach sich bei dieser Berufung sehr eingesetzt haben.

Anton Wassmuth (5.5.1844 - 22.4.1927) hatte sich schon in seiner Gymnasialzeit mit höherer Mathematik beschäftigt. Er studierte u.a. in Prag bei Ernst Mach und war 1866-1870 Assistent an der deutschen technischen Hochschule in Prag. 1870 Assistent an der Technik in Wien, wurde er 1871 Privatdozent für Elektromagnetismus an der Philosophischen Fakultät der Universität Wien. Mit Wirkung vom 23. Juli 1876 wurde Wassmuth zunächst als Extraordinarius, mit 27.2.1882 als Ordinarius für mathematische Physik an der neu errichteten Universität Czernowitz ernannt. In Innsbruck (1890-1893) war er Ordinarius und Leiter des Instituts für mathematische Physik und erhielt eine noch heute bestehende mathematisch-physikalische Lehrmittelsammlung angegliedert.

Seine zahlreichen interessanten Arbeiten erstreckten sich auf Thermoelastizität, Elektromagnetismus und statistische Mechanik. Im Lehrbetrieb bemühte er sich, die modernsten Ideen von Maxwell, Hertz, Planck und anderen vorzutragen. Durch sein Lehrbuch über statistische Mechanik und seine Versuche über den Einfluss äußeren Drucks auf elektromagnetische Phänomene und über die Tragfähigkeit von Elektromagneten machte er sich einen Namen. Er wurde 1903 Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Wien und war 1891 Dekan der Philosophischen Fakultät der Universität Innsbruck. Er verließ 1893 Innsbruck und übernahm bis 1915 das Ordinariat für mathematische Physik an der Universität Graz.

Zum Nachfolger von Wassmuth wurde mit kaiserlicher EntschlieÙung vom 15. März 1894 Karl Exner zum Ordinarius der mathematischen Physik in Innsbruck ernannt und zwar mit der speziellen Verpflichtung, nun zusätzlich Vorlesungen über analytische Mechanik zu halten. Das Ministerium folgte dem Vorschlag der Fakultät, der primo loco auf Exner und tertio loco auf Tumlirz (Czernowitz) gelaute hatte. Karl Exner (26.3.1842 - 11.12.1914) hatte in Wien, Zürich und Freiburg studiert und war zunächst als Mittelschullehrer tätig. Erst 1892 habilitierte er sich als Privatdozent für theoretische Physik an der Universität Wien.

Exner zeichnete sich durch originelle Ideen und experimentelles Geschick aus. So gelang es ihm, die Newtonschen Farbenringe theoretisch zu deuten, er beschäftigte sich mit meteorologischer Optik, dem Funkeln der Sterne und erhielt 1890 den Baumgartner-Preis der Akademie und einen anderen Preis von der chemisch-physikalischen Gesellschaft in Wien. Eine schwere Krankheit zwang Exner, sich 1904 pensionieren zu lassen.

Infolge dieser Erkrankung wurde Michael Radakovic (25.4.1866 - 26.8.1934), der sich bei Exner habilitiert hatte, als Supplent berufen (1902 - 1904). Dies lag nahe, da Radakovic mit kaiserlicher EntschlieÙung vom 24.6.1902 zum unbesoldeten Extraordinarius in Innsbruck ernannt worden war. Mit kaiserlicher EntschlieÙung vom 4. August 1905 wurde Ottokar Tumlirz zum Nachfolger Exners in Innsbruck ernannt (1905 - 1925). Tumlirz (17.1.1856 - 4.5.1928) erhielt seine Ausbildung an der Prager Universität bei Mach und war seit 1878 Assistent an der Lehrkanzel für Experimentalphysik von Mach. Die 1882 erlangte *venia für Physik* wurde 1890 an die Wiener Philosophische Fakultät übertragen, wo Tumlirz Assistent bei Stefan war. 1891 wurde er zum Extraordinarius für mathematische Physik und im März 1894 zum Ordinarius in Czernowitz ernannt. In der Lehre bemuhete er sich, die Entdeckung der Röntgenstrahlung, der Radioaktivität sowie die Plancksche Quantentheorie besonders zu berücksichtigen. Seine Arbeiten umfassten spezielle Fragen der Thermodynamik und des Elektromagnetismus. Sein Buch über die elektromagnetische Theorie des Lichts und ein zweites Buch über das Potential wurden ins Italienische und ins Englische übersetzt. 1904 wurde er Mitglied der Akademie in Wien.

Nach dem Ausscheiden von Tumlirz wurde Arthur March (23.12.1891 - 17.4.1957) mit der Supplierung und 1926 als Extraordinarius zum Nachfolger ernannt (1926 - 1957). Der Fakultatsvorschlag hatte damals *primo loco* Erwin Schrödinger und March *secundo loco* enthalten. Bedauerlicherweise kam auf unbekanntem Wege dieser Vorschlag in die Öffentlichkeit, und es setzte in den lokalen Zeitungen (vermutlich aus der Kenntnis der freien Denkungsart Schrödingers) eine Hetze gegen ihn ein. Es wurde argumentiert, dass man für den Gehalt von rund 1200 S für Schrödinger mindestens drei normale Bundesbedienstete bezahlen könne. Für March, der von diesen Aktionen nicht die leiseste Ahnung hatte, ergab dies eine sehr unangenehme Situation. Er sah sich daher veranlasst, in mehreren Erklärungen sich von diesen Aktionen strikt zu distanzieren.

Arthur March, der in Innsbruck, München und Wien studiert und bei Tumlirz dissertiert hatte, trat zunächst eine kurze Assistentenstelle an der Sternwarte in Innsbruck an und wurde bis 1924 Professor am Madchenrealgymnasium in Innsbruck. 1917 habilitierte er sich als Privatdozent für theoretische Physik unter anderem mit Arbeiten zur Elektronentheorie der Metalle und zur kinetischen Theorie der Verdampfung. Für seine Arbeiten über die Druckabhängigkeit des elektrischen Metallwiderstandes erhielt er 1916 einen Fakultatspreis. Schwerpunkt seiner Vorlesungen waren die Maxwellsche Theorie des Elektromagnetismus und die kinetische Gastheorie. Er hielt jedoch einen mehrsemestrigen Zyklus über das Gesamtgebiet der theoretischen Physik. Am 30.9.1936 wurde er auf Grund seiner hochqualifizierten international bekannten Arbeiten zum Ordinarius ernannt. Sein Ruf führte dazu, dass er 1934 als Gastprofessor an die Universität Oxford berufen wurde, wo er gemeinsam mit dem österreichischen Nobelpreisträger Erwin Schrödinger bis 1936 wirkte.

Seine Vertretung in Innsbruck besorgte inzwischen Ao. Prof. Theodor Sexl aus Wien. Nach Innsbruck zurückgekehrt, entwickelte er eine grundlegende Theorie der kleinsten Länge, die großes Aufsehen erregte. Als aber Heisenberg die Idee aufnahm, wurde sie fälschlicherweise diesem zugeschrieben. Mehrere Bücher, 1919 "Theorie der Strahlung und der Quanten", 1931 "Die Grundlagen der Quantenmechanik", 1933 "Moderne Atomphysik", 1948 "Natur und Erkenntnis", 1951 in englischer Sprache "Quantum Particles and Wave Fields" machten ihn weitgehend bekannt. In Verbindung mit Hess und Schrödinger entstand in Innsbruck in diesen Jahren ein internationales Zentrum der theoretisch-physikalischen Forschung. Seine anschaulichen und klaren Vorlesungen machten March zu einem der beliebtesten Lehrer der Universität Innsbruck. Er war Mitglied der Wiener Akademie der Wissenschaften. (Weitere Literatur: Nachruf auf March: Ferdinand Cap, Acta Austriaca Band 11, 1957, Heft 3.)

Die Bedeutung der Innsbrucker theoretischen Physik wurde 1950/51 auch durch die Gastprofessur von Erwin Schrödinger unterstrichen. Schrödinger las damals eine fünfstündige Vorlesung über die einheitliche Feldtheorie der allgemeinen Relativitätstheorie und des Elektromagnetismus, in welcher der mit 10 Komponenten symmetrische Fundamentaltensor auf 16 Komponenten erweitert wurde. Die unsymmetrischen 6 neuen Komponenten wurden mit den elektromagnetischen Feldgrößen identifiziert. Damals hatte Albert Einstein in Princeton eine völlig analoge Theorie, aber mit komplexen Komponenten des Fundamentaltensors erdacht. Für mich selbst als Schrödinger zugewiesenen jungen Assistenten war es faszinierend, mit ihm zusammenzuarbeiten und die Korrespondenz zwischen den zwei Heroen der theoretischen Physik laufend mitverfolgen zu dürfen.

Hans Thirring (geb. 1888), der das Ordinariat für theoretische Physik in Wien bis zur Entfernung durch die Nationalsozialisten innegehabt hatte (und wo ich 1944-1949 Mitarbeiter war), hatte im Wintersemester 1945-46 Vorlesungen als Gastprofessor in Innsbruck gehalten. 1946 bis 1958 war er wieder Ordinarius für theoretische Physik an der Universität Wien.

Für Schrödinger ergab sich 1950 ein weiteres Problem mit Tirol. Zwei Monate nach Antritt seiner Gastprofessur beauftragte er mich, bei der Quästur nachzufragen, warum er bisher noch keine Bezüge bekommen habe. Der zuständige Beamte der Quästur erklärte, er könne deshalb kein Geld auszahlen, weil Herr S. sich geweigert habe, in einem Formular sein Religionsbekenntnis anzugeben. Ob denn nicht ich wisse, welches Religionsbekenntnis S. habe. Nach der Antwort "konfessionslos" wurde das Gehalt nun ausbezahlt. Leider hatte dies später eine weitere Folge: Als Schrödinger auf dem Friedhof in Alpbach 1961 beerdigt werden sollte, verwehrt der Ortspfarrer zunächst die Beerdigung eines Konfessionslosen. (Vgl. Schrödinger und Tirol, Jahrbuch Überblicke der Mathematik 1986, 211-216, Bibliographisches Institut Mannheim.)

Die Anfänge der Plasmaphysik in Innsbruck

Als ich 1949 zur Unterstützung von Arthur March von einem Studienaufenthalt an der ETH Zürich nach Innsbruck kam und meine Wiener Assistentenstelle (seit 1944) nach Innsbruck transferiert wurde, hatte ich im Studienjahr 1950/51 das große Privileg, mit dem damals in Innsbruck als Gastprofessor anwesenden österreichischen Nobelpreisträger Erwin Schrödinger zusammen zu arbeiten. Damals lernte ich die vereinheitlichte Feldtheorie von Gravitation und elektromagnetischem Feld kennen. Seit 8. Juli 1949 für theoretische und technische Physik habilitiert, wurde mir bald die Betreuung von Dissertanten übertragen. Meine damaligen Veröffentlichungen betrafen eine Spinortheorie der Elementarteilchen, über die Aktinidengruppe des periodischen Systems der Elemente, über das Fermat-Prinzip in absorbierenden Medien, sowie über eine singularitätenfreie nichtlineare pseudoskalare statistische Mesonentheorie der Kernkräfte. Da zu dieser Zeit nur der kranke Prof. March und ich in Innsbruck die theoretische Physik vertraten, meldeten sich bald Studierende mit dem Wunsch, den Erfordernissen der Industrie nahe stehende Dissertationsthemen vorgeschlagen zu bekommen.

Ein Physikdiplom oder einen Magistergrad gab es damals noch nicht. So erinnerte ich mich an meine gasdynamischen Arbeiten, woraus dann die ersten Dissertationen auf dem Gebiet der Strömungslehre und der Magnetohydrodynamik bzw. Plasmaphysik 1958 entstanden.

Neben Arbeiten über Atomkraftwerke wurden mit Hinblick auf die verschiedenen Anwendungen der Plasmaphysik auch später ausgedehnte Studien über Energiephysik betrieben.

Mein Interesse an Magnetohydrodynamik und an der Physik der thermonuklearen Fusion wurde auch dadurch gestärkt, dass ich im September 1958 als Mitglied der österreichischen Kernenergiekommission in der österreichischen Delegation zum Genfer IAEA Kongress ("Atoms for Peace") über Kernspaltungs- und Fusionsreaktoren zu fahren hatte. Da schon 1957, noch vor der Gründung des Plasmainstitutes in Garching, in Innsbruck erste Vorarbeiten zur Magnetohydrodynamik betrieben wurden, wurde ich von Prof. Bopp, München, zu Beratungen über die Gründung eines Plasmaphysikinstitutes im Rahmen der Max-Planck-Gesellschaft in Garching und bezüglich der Berufung von Arnulf Schlüter um Rat gebeten.

Im April 1957 wurde ich von einem Forschungsaufenthalt am Bohr'schen Institut in Kopenhagen, wo sich damals die Theorieabteilung des in Genf in Gründung befindlichen CERN Institutes befand, von der Universität Innsbruck zurückgeholt, um die durch den Tod von Arthur March (1891-1957) völlig verwaiste theoretische Physik zu supplieren (ab 19.4.1958 als Ao. Professor, ab 15.9.1960 ord. Professor bis zur Emeritierung am 30.9.1988). Anlässlich der Berufungsverhandlungen für das Extraordinariat mit Sektionschef Adalbert Mezniak - das Ordinariat nach March wurde aus Einsparungsgründen herabgestuft - wies mich dieser darauf hin, dass es trotz des Hochschulbudgetpostens von nun sogar 0.27% des BIP [2] leider nicht

möglich sei, die derzeitige jährliche Institutsdotation von 6000 ÖS (entsprechend 436 Euro, entsprechend etwa 6 Büchern und 2-3 Zeitschriften) zu erhöhen. Hierzu muss aber bemerkt werden, dass diese Summe gegenüber den früheren Jahren einen gewaltigen Fortschritt bedeutete: wenige Jahre vorher - 1954 - betrug die Dotation 2134 ÖS = 155 Euro (vgl. S. 138 in [2]). Auch sei es nicht möglich, für den Besuch von Kongressen Reisekostenzuschüsse zu gewähren - ich möge doch wie seinerzeit 1950 bei der Gründung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft und dem ersten Kongress alle Kosten selbst bezahlen [1].

Es sei mir noch ein persönliches Wort zu den politischen Verhältnissen an den österreichischen Universitäten gestattet. Als ich als gewählter Innsbrucker Privatdozentenvertreter in der Fakultät (das gab es schon vor dem UOG) in einer Berufungsangelegenheit schüchtern auf Herrn A. hinwies bekam ich die erstaunte Antwort: "A. ist zwar sehr tüchtig, aber gehört doch nicht zu uns!" - wobei unter "uns" eine der an den Hochschulen wirkenden Vorfelddorganisationen einer politischen Partei, der ich nicht angehörte, gemeint war. Kurze Zeit später wurde mir von einer analogen Vorfelddorganisation einer anderen Partei vorgeschlagen, ich möge doch dieser beitreten. Da jedoch auf dem mir übermittelten Aufnahmeformular die Frage stand, welche Position ich in Zukunft anstrebe und wie man mir dabei helfen könne, lehnte ich mit Entrüstung ab und blieb mein ganzes Leben allen politischen Parteien und ihren Vorfelddorganisationen fern. Wieso ich trotzdem 1958 zum Ao. Universitätsprofessor für theoretische Physik an der Universität Innsbruck ernannt wurde, ist mir heute noch nicht ganz klar und dürfte auf die Gutachten von F. Bopp, W. Gröbner, W. Heisenberg, A. March, E. Schrödinger, R. Steinmaurer und H. Thirring zurückzuführen sein.

Frühe Förderungen und Projekte

Die heute kaum mehr vorstellbare Notlage der österreichischen Wissenschaft führte u.a. in Innsbruck im März 1952 durch Gröbner und Cap zur Gründung einer "Zentralstelle für wissenschaftlich-technische Entwicklungsarbeit" (S. 29 in [1] und S. 121 in [2]). Zweck dieser Einrichtung war vor allem das Auftreiben von Sponsorgeldern, wobei die ersten beiden Projekte zunächst 110.000 ÖS (8.000 Euro) brachten [2].

Als 1961 in Salzburg die erste Fusion Energy Conference abgehalten und somit abermals das internationale Interesse an Plasma- und Fusionsphysik feststand, wurden die Innsbrucker Arbeiten intensiviert. Es wurden von mir und von Studenten u.a. Potentialströmungen in der Magnetogasdynamik, die Ausdehnung des Satzes von Crocco der Gasdynamik auf die Magnetogasdynamik, die Charakterisierung des MGD Potentials und die Thermodynamik von Plasmen untersucht. Der Einfluss endlicher elektrischer Leitfähigkeit oder der Viskosität und die Verwendbarkeit von Variationsverfahren zur Lösung von MGD Problemen wurden untersucht (1960-1968).

Zur gleichen Zeit erwachte auch das Interesse der Wirtschaft und wissenschaftlicher Institutionen an der praktischen Verwendbarkeit der Plasmaphysik. So kam es auch zu den in Tabelle 1 genannten finanziellen Förderungen, die erstmals ein intensives Arbeiten und die Anstellung von Dissertanten und Mitarbeitern ermöglichten.

Tabelle 1: Frühe Projektförderungen für die Plasmaphysik in Innsbruck

1. Plasmaprojekt Innsbruck amerikanischer Regierungsstellen 1963-1981, gefördert mit einigen Millionen Dollar.
2. BMf.Handel der Republik Österreich, Magnetohydrodynamische Stromerzeugung 1967.
3. Finanzierungen durch den österreichischen Wissenschaftsfonds. Es wurden folgende Projekte durchgeführt:
 - 564: Plasmakanalströmungen (1968-1969)
 - 600,1103,1458: Experimentelle Untersuchungen an einer Q-Maschine (1969-1972)
 - 976,1258: Ähnlichkeitstransformationen in der Plasmaphysik (1970-1976)
 - 1735,1737: Plasmawellenechos (1974-1976)
 - 1458,1490,1717,2781: Plasmaschwerpunkt (Rektorenkonferenz, 1973-1983)
 - 3840: Toroidale elektromagnetische Wellen (1979)
4. Auch der Fonds der gewerblichen Wirtschaft erkannte nun die industrielle Bedeutung der Plasmaphysik und förderte folgende Projekte:
 - 189: Wirkungsgradverbesserung von MGD-Generatoren (1968-1969)
 - 1738: Wärmeverlust in MHD Generatoren (1968-1972)
 - 02/91: Stromdichteverteilung an MHD Generatoren (1972-1974)
5. Industriellenverband Tirol: Bau und Patentanmeldung eines Stromgenerators auf Basis der Differentialgleichung der parametrischen Instabilität der Plasmaphysik, 1982.
6. Handelskammer Innsbruck, Bezahlung einer Gastprofessur, Schmidt (Berlin), Mathematische Methoden zur Berechnung parametrischer Schwingungen (1986-1988).

Das steigende Interesse der Öffentlichkeit an der Weltraumforschung, hervorgerufen durch den Sputnikstart 1958, führte zu internationalen Aktivitäten. So wurde ich im Jänner 1961 als Vertreter Österreichs nach Straßburg zu einer Sitzung betreffend die Errichtung einer europäischen Weltraumforschungsorganisation entsandt, was sich dann in zahlreichen weiteren Sitzungen auch auf UNO-Ebene fortsetzte (COPERS - Commission Préparatoire Européenne pour Recherches Spatiales in Paris, London, Genf, etc., 1961-1963 und Subcommittee for the Peaceful Uses of Outer Space, UNO, Genf, New York, 1964-1976). Am 15.7.1963 durfte ich im Auftrag des Rektors die erste Alpbacher Weltraum-Sommerschule eröffnen. 1968 fand in Wien im August die UNISPACE-UNO Weltraumkonferenz statt, die ich mehrmals UN-Generalsekretär Waldheim in New York vorgeschlagen hatte.

Auch die Österreichische Akademie der Wissenschaften (deren geophysikalischer Kommission ich seit 1964 für einige Jahre angehörte) begann sich für Weltraumforschung einzusetzen. Durch deren finanzielle Hilfe war es 1970 möglich, eine Q-Maschine anzuschaffen, deren Zweck es war, Plasmainstabilitäten, insbesondere im Weltraum vorkommende, experimentell zu untersuchen. Die Untersuchungen wurden zunächst bis 1975 gefördert, und 1981-1991 gab es ein Akademie-Forschungsprojekt, das sich auch mit Fusionsphysik beschäftigte.

Die Akademie verlangte laufende Arbeitsberichte, die unter den Bezeichnungen AR1 bis AR10 in der Zeit 1970-1975 angefertigt wurden. Außerdem veranstaltete die Akademie auch Plasmaphysiktagungen, z.B. in Wien 1983 und 1986 sowie 1990 ("Informationstagung Fusion"), ferner in Schladming 1991. Da sich nun auch andere österreichische Universitäten, insbesondere Graz, für Weltraum- und Fusionsplasmen interessierten, schuf die Akademie eine Kommission zur Koordination der Fusionsforschung in Österreich, in welcher ich in der Zeit von 1980-2005 in 60 Sitzungen Innsbruck vertrat.

Das in all diesen Jahren in zahlreichen Publikationen und bei Kongressen veröffentlichte Material regte mich schließlich zur Verfassung von vier Büchern an:

1. Einführung in die Plasmaphysik. 3 Bände, Vieweg, Braunschweig, 1970, 1972, 1975.
2. Handbook on Plasma Instabilities, 3 Vols, Academic Press, New York, 1976-1982.
3. Waves and Instabilities in Plasmas, CISM Course, Springer, Wien, 1993.
4. Lehrbuch der Plasmaphysik und der Magnetohydrodynamik, Springer, Wien, 1994.

Internationale Kontakte:

Innsbruck erscheint auf der Weltkarte der Plasmaphysik

Die von W. Gröbner entwickelte Methode, Differentialgleichungen mittels Lie-Reihen zu lösen, machte die NASA auf die Universität Innsbruck aufmerksam. So kam es dazu, dass Prof. Gröbner mich bat, ihn bei einer Einladung im Juni 1961 und September 1962 nach Kalifornien zu vertreten. Bald begann sich die NASA auch für die plasmaphysikalischen Arbeiten zu interessieren und es kam zu mehreren Einladungen der NASA und von USA Universitäten (Washington, Philadelphia, Goddard Space Center, Cape Kennedy).



Abb. 3.1.1: Prof. Ferdinand Cap, Interview im ORF 1969

In der Zeit Jänner bis Juni 1967 war ich als "Senior Visiting Professor" an der New York City University lehrend und forschend in Plasmaphysik tätig und von März bis Dezember 1971 arbeitete ich als "Senior Research Associate" am Goddard Space Flight Center in Greenbelt, MD, und an der University of Maryland (Mai 1971). Weitere meist zweimonatige Gastprofessuren wurden absolviert an der Lomonossow Universität Moskau und Leningrad (1965), an der Universität Jasi (Rumänien 1971) und an der Tohoku Universität in Sendai (Japan 1974), am Lebedev Institut in Moskau (1976), und in der Zeit Dezember 1978 bis Februar 1979 war ich Senior Research Associate am Plasma Physics Lab der Universität Princeton. Einer Gastprofessur in Kyoto im März-April 1980 folgte eine längere Gastprofessur an zehn Universitäten in Südafrika (August-September 1980). Weitere Gastprofessuren von zwei Monaten folgten in Berkeley, Albuquerque, Los Alamos, MIT, New Orleans u.a., in Moskau, Sofia, Ahmedabad, Novosibirsk, Akademgorodot oder in Kairo.

Umgekehrt gelang es, hervorragende Forscher aus 27 Staaten für 112 kürzere oder längere Aufenthalte als in Innsbruck mitarbeitende Gäste zu gewinnen. Es sollen hier nur einige der längerfristigen und für uns wichtigsten Gastforscher angeführt werden. Von besonderem wissenschaftlichen Wert für unsere Gruppe waren die folgende Gäste:

N. Jen (New York, 1969/70), S. Koch (New York, 1970), M. Gardner (Bangor, 1973), K. Sauer (Berlin, 1976, 1978, 1980), J. Rasmussen (Risoe, 1976, 1977, 1980, 1986), R. Itatani (Kyoto, 1976), N. Sato (Sendai, 1975, 1977, 1979, 1980), H. Motz (Oxford, 1976), Y. Zakharov (Akademgorodok, 1976), R. Hatakeyama (Sendai, 1977/78, 1981), M. Sandulovicu (Jasi, 1977/78, 1981, 1989), L. Krlin (Prag, 1978, 1987, 1990/91), S. Bulanov (Moskau, 1983), G. Popa (Iasi, 1979, 1983, 1984, 1985, 1989), S. Takeda (Nagoya, 1978, 1979, 1985), D. Saeki (Sendai, 1980), J. Zagrodzinski (Warschau, 1980), J. Neethling (Pretoria, 1981), W. Schuurmann (Rijnhuizen, 1980-84), C. Birdsall (Berkeley, 1981, 1984, 1985, 1991), A. Ganguli (New Delhi, 1980), P. Krumm (Durban, 1981/82, 1984), W. Thompson (San Diego, 1981/82), A. Sakharov (Moskau, 1981, 1983/84), L. Lewin (Boulder, 1981, 1982), I. Zhelyazkov (Sofia, 1987, 1991, 1992), S. Khalil (Kairo, 1987/88), V. Demchenko (IAEA, Wien, 1988), M. Villars (Santander, 1991), N. Zaki (Kairo, 1990/91), u.a.

Eine besondere Situation ergab sich bei P. Shukla aus Indien, der mir von K. Singh empfohlen wurde (1972-1974) und dann in Europa (Jülich) blieb und heimisch wurde. Eine ähnliche Situation ergab sich bei R. Deutsch aus Rumänien (1975-1977), der anlässlich eines Kongresses in Innsbruck verblieb. Die internationale Plasmagemeinschaft hat hervorragend solidarisch reagiert - um Frau und Tochter aus dem damals "sozialistischen" Rumänien die Ausreise zu erbitten, wurden ca. 800 Briefe internationaler Kollegen an den Staatschef und Physiker

Ursu, der die Präsidentschaft der Europäischen Physikalischen Gesellschaft anstrebte, geschrieben. Dies hatte Erfolg: Deutsch konnte mit seiner Familie zunächst als Plasmaphysiker in meiner Gruppe arbeiten, erhielt als Asylant und geflüchteter Wissenschaftler der Universität Innsbruck die österreichische Staatsbürgerschaft und lebt heute in Deutschland.

Die Themen, die im Zeitraum 1960-1994 bearbeitet wurden, umfassten mehrere hundert Probleme, wie sie aus der Liste der Veröffentlichungen und Kongressberichte hervorgehen. Insbesondere wurden bearbeitet: MGD Strömungen und neue mathematische Methoden, Plasmaantriebe, Randschichtprobleme, Plasmainstabilitäten, Sonnenwind und Magnetosphären, Fusionsphysik, MHD Stromerzeugung, Probleme der Ionosphäre, Simulationsverfahren, Vlasovgleichung, Plasmagleichgewichte und Einschlussmethoden, Q-Maschinen, Double-Plasma Maschine, Driftwellen, Turbulenz, nichtlineare Effekte, kinetische Gleichungen, Echophänomene, Magnetfelder am Mond, Hohlkathode, Wellen in Plasmen, Ramanstreuung, Stoßwellen, etc. etc. ...

Tabelle 2: Wichtige Kongresse in Innsbruck

Von den zahlreichen besuchten Kongressen sollen nur diejenigen erwähnt werden, die in Innsbruck selbst 1973-1998 stattfanden:

1. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (Magnetosphäre der Erde), 1973
2. First International Congress on Waves and Instabilities, 1973
3. 2nd Int. Congress on Waves and Instabilities, 1975
4. 7th IAEA Fusion Energy Conference, 1978
5. 4th Int. ISPIM Innovations Conference, 1985
6. Österreichische Physikalische Gesellschaft, 1986
7. 37th Int. Astronautical Congress, 1986
8. International Congress on Plasma Physics ICPP,
zusammen mit der 9. EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, 1992
9. Österreichische Physikalische Gesellschaft, 1994

In Zusammenhang mit dem Sputnikstart und den NASA-Aktivitäten kam es noch zu einer anderen für Innsbruck positiven Entwicklung (ca. 1958-1968). Die Library of Congress, Washington, ersuchte mich, aus der europäischen wissenschaftlichen Literatur kurze Abstracts anzufertigen: dies eröffnete mir eine weitere Möglichkeit, sprachkundige Studenten und Mitarbeiter (zeitweilig bis zu 60) finanziell zu unterstützen. Es konnten über 5000 Abstracts geliefert werden und die Innsbrucker Gruppe hatte wirklich erstmalig die Möglichkeit, mehr ausländische wissenschaftliche Zeitschriften zu beziehen.

Theoretische Plasmaphysik auf der ZUSE 22: die Anfänge des wissenschaftlichen Hochleistungsrechnens in Innsbruck

Der Verfasser der ersten Innsbrucker plasmaphysikalischen Dissertation, Engelbert Hofinger, hat schon 1954 in Tirol auf einer elektronischen Rechenmaschine (Zuse 11 der Tiroler Landesregierung im Vermessungsamt) gearbeitet.

Bald danach war es mir möglich, im Rahmen einer Wissenschaftsaktion des Marshallplanes für mein Institut (Theoretische Physik) eine Zuse Z22 zu erwerben. Die Fakultät hat dann diese Einrichtung als Rechenmaschineninstitut bezeichnet und den Mathematiker Heinrich Schatz als zweiten Vorstand bestellt. Das neue Institut befand sich im Parterre und im ersten Stock des Universitätsgebäudes Innrain 52, mit Eingang durch die noch heute vorhandene westliche große Türe. Über Modem wurde eine Zusammenarbeit mit der Universität Graz etabliert. In der Folge kam es zu einer Zusammenarbeit mit der Tiroler Wirtschaft. DI Pezzei, der als Statiker Tiroler Lifte und Seilbahnen berechnete, hat durch die von ihm eingebrachten Mittel geholfen, Kosten der Rechenanlage (Lochstreifen etc.) zu decken. Als ich es wagte, diese Geldmittel vorübergehend zinsbringend bei einer Bank anzulegen, reiste ein Ministerialrat eigens von Wien nach Innsbruck, um mich strengstens zu ermahnen und zu fordern, diese in der staatlichen ("kameralistischen") Buchhaltung völlig unmögliche und unerlaubbare Aktion sofort einzustellen.

Am Recheninstitut hatte ich drei Assistenten: Hans Knapp (später o.Univ.-Prof. in Linz), Bruno Buchberger (später o.Univ.-Prof. in Linz), und Peter Kaps (derzeit Ao.Univ.-Prof. in Innsbruck), der eines der ersten Schachprogramme an der Zuse schrieb. Damals hielt ich auch Lehrgänge über Computer in der Wirtschaft.

Als es etwas später zur Errichtung der Bau fakultät kam, konnten Heinrich Schatz, der im ersten Kuratorium war, und ich nach schweren und langen Kämpfen erreichen, dass auf dem dortigen Areal auch ein Gebäude für eine moderne Rechenanlage errichtet wurde. Als Vorstand dieses "Rechenzentrums" (heute ZID) habe ich dann nach Genehmigung durch die Finanzprokuratur einen 28 Millionen ÖS Vertrag mit der Firma Control Data (Wien) unterzeichnet. Da meine halbtägige Schreibkraft nicht Steno konnte und ein Aufnahmegerät nicht verfügbar war, hat meine Frau die gesamten Verhandlungen mit dem Anwalt betreffend Garantien, Betriebsmittelhöhe etc. protokolliert.

Als es mit Unterstützung von Schatz gelang, 1969 eine Lehrkanzel für Numerik und Informatik zu schaffen, wurde Rudolf Albrecht 1970 (bis 1996) auf die Lehrkanzel am nun so genannten Institut für Informatik berufen. Ich übergab ihm dann baldig die Vorstandschaft des Rechenzentrums. Die ersten dortigen Angestellten (Müller, Bielowsky, ...) wurden zunächst von mir, dann von Albrecht und der Rechenmaschinenkommission der Universität eingestellt.

Resümee

Die Zusammenarbeit mit Studenten und Mitarbeitern sowie mit zahlreichen ausländischen Gästen hat mir neben der Lehre in Innsbruck (100 Dissertanten in allen meinen Gebieten) so viel Freude und Genugtuung gebracht, dass ich trotz der anfangs extrem bescheidenen Verhältnisse keine einzige der 31 Berufungen (zuletzt 1988) angenommen habe. Da ich immer dachte, dass bei Förderstellen die vorgeschlagene wissenschaftliche Untersuchung wichtiger sei als das vorangehende Ausfüllen bürokratischer Formulare, wo und wann (und weshalb) man geboren wurde, wie viele Kinder, wann promoviert etc., habe ich es abgelehnt, bei europäischen Stellen Projekte selbst einzureichen. Meinen Nachfolgern in Innsbruck, Graz und Wien wünsche ich aber alles Gute für die Zukunft. Diese berichten auf den folgenden Seiten selbst über die Situation nach 1988.



Abb. 3.1.2: Das Studium an der Universität Wien konnte Ferdinand Cap 1945 mit sub auspiciis praesidentis Bedingungen abschließen. Da es zur damaligen Zeit keine sub auspiciis Ehrung gab, wurde Cap nachträglich im Jahr 1989 gemeinsam mit seinem Sohn Clemens sub auspiciis praesidentis unter Bundespräsident Waldheim promoviert.

Referenzen:

- [1] G. Oberkofler: Ferdinand Cap, Otto Hittmair. Aus den Pionierjahren der Innsbrucker theoretischen Physik. Studienverlag, Innsbruck, 2006.
- [2] S. 143 und S. 145 in: G. Oberkofler, E. Rabofsky: Wissenschaft in Österreich 1945-1960. P. Lang Verlag, Frankfurt/Main, 1989.

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 Weltraumplasma-physik 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.

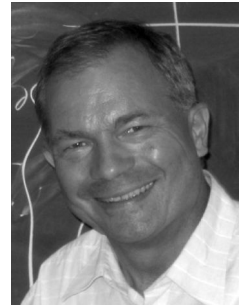
Entsprechend den Spezialgebieten der einzelnen Dozenten wurden von diesen zahlreiche Diplomarbeiten und Dissertationen betreut, und es entstanden um sie international anerkannte Forschungsgruppen, denen neben den Diplomanden und Doktoranden auch Post-Docs und renommierte Gastwissenschaftler aus verschiedensten 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.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. Gieseke 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. Krlin 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 „BPSen“ 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 dazustießen, 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.

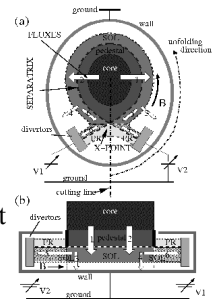
Ich bin also bei allen sich bietenden Gelegenheiten bemüht, die Forschungsaktivitäten meiner Gruppe in der einen oder anderen Weise dem Ziel der ITM nutzbar zu machen.

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).

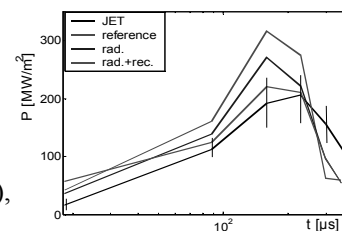


Dr. David Tskhakaya (jun.):

- 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. Krlin), 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 Winterschool mit bis zu 100 Teilnehmern, auf der international bekannte Plasmaphysiker vortrugen.

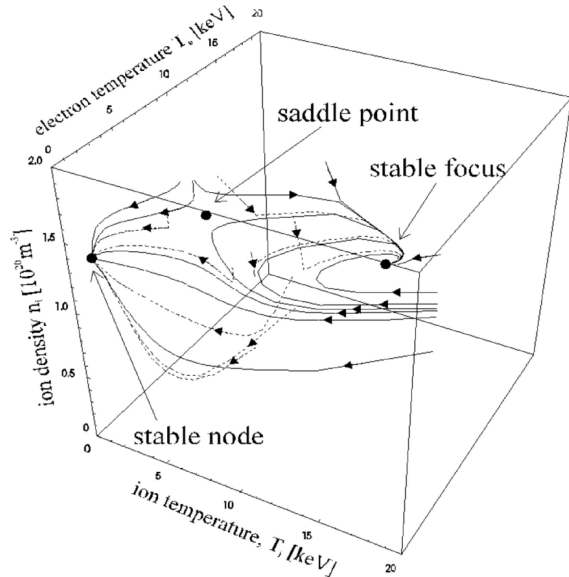
1991 erhielt ich die Einladung zu einem Aufenthalt als Visiting Professor am Institut für Kernenergieforschung in Obninsk, Russland, sowie zu einem Vortrag an der Technischen Universität Moskau. In Obninsk lernte ich Dr. Viktor Sosnin kennen, den ich dann 1992 für ein Jahr als Post-Doc an unser Institut 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 Forschungsk Kooperation, 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 Forschungskooperation 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 Plasmaströmprofile 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.

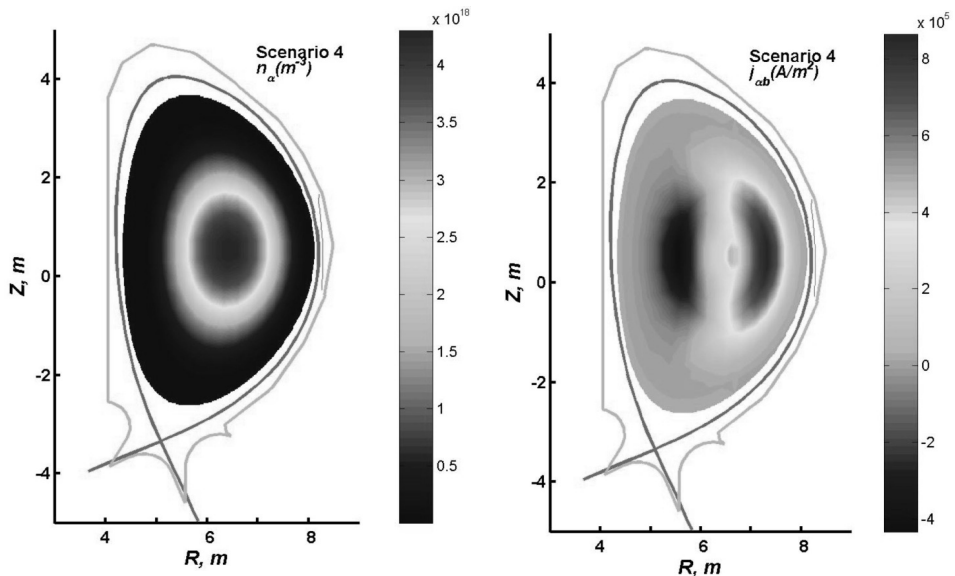


Abb. 3.2.2.2: Links: Dichteverteilung von DT-Alphas in der poloidalen Querschnittsebene von ITER. Rechts: Dichteprofil des durch schnelle Alphateilchen erzeugten „Bootstrap“ Stroms im ITER-Fusionsplasma.

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 fraktionalen 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 „Straßenverkehrsnetzwerke 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_2 - und SiN -Barrierschichten bei der kristallinen Silizium-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 prädiktiv zu modellieren, wodurch falsche Maßnahmen, wie sie z.B. bei der Katastrophe im Mont-Blanc-Tunnel passierten, von vornherein ausgeschlossen werden können. ■

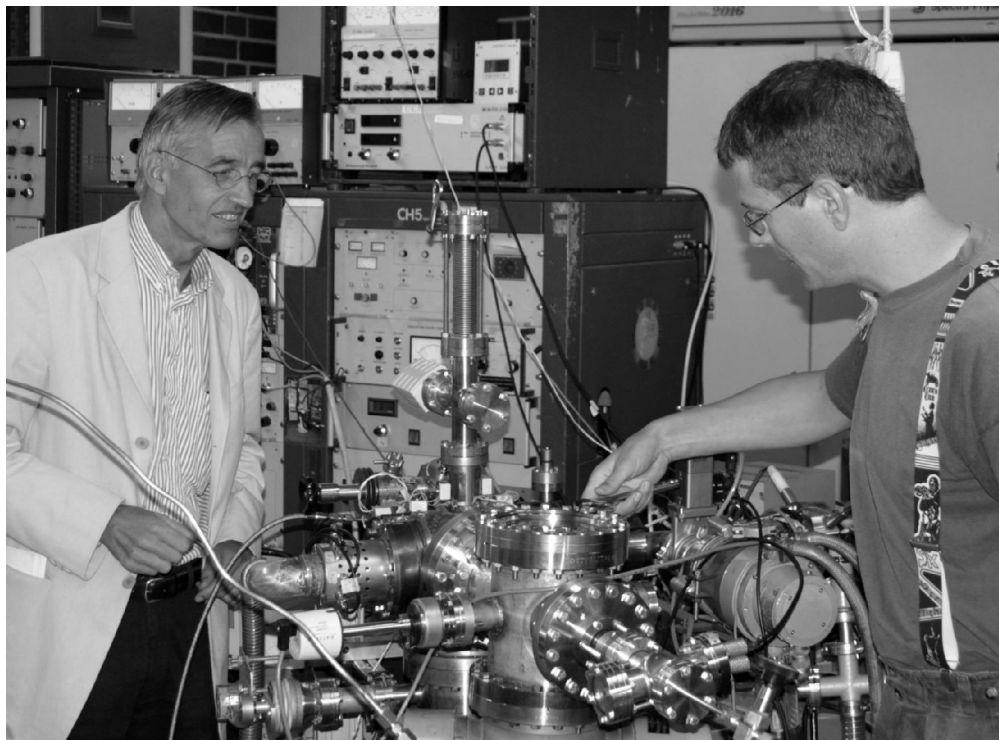


Abb. 3.3.1.1: Univ.-Prof. Dr. Tilmann Märk und Univ.-Prof. Dr. Paul Scheier in ihrem Labor am Institut für Ionenphysik der Universität Innsbruck (August 2004).

3.3 Plasmaphysik am Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik

3.3.1 Ionenphysik und Angewandte Physik

Univ.-Prof. Dr.phil. Dr.h.c.mult Tilmann Märk

Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, Univ. Innsbruck

Die Nachkriegszeit in Österreich war einerseits von dem Gefühl der totalen Zerstörung – Kultur, Wissenschaft und Wirtschaft waren auf einem Tiefpunkt angelangt –, andererseits von einem ungeheuren Lebenswillen der Menschen, einer wirtschaftlichen Aufbruchstimmung und von einem ungebrochenen Optimismus geprägt. Als ich 1962 mein Physikstudium begann, wurde dies – es mag heute unglaublich klingen – von nur zwei ordentlichen Professoren vermittelt, dem Experimentalphysiker Rudolf Steinmaurer und dem Theoretiker Ferdinand Cap; später kam dann noch der Experimentalphysiker Josef Kolb als Extraordinarius dazu. Trotz dieser personellen Knappheit gelang es diesen Professoren, eine Breite und Tiefe zu vermitteln, die es mir als österreichischem Absolventen erlaubte, nach abgeschlossenem Dr. phil. Studium einen anschließenden zweijährigen USA-Forschungsaufenthalt optimal zur wissenschaftlichen Weiterbildung zu nützen (es gehörte damals zum guten Ton eines angehenden Wissenschaftlers ein USA-Auslandsjahr zu absolvieren). Das heißt bereits in den 60er Jahren war die Ausbildung in Österreich vergleichbar mit der in den USA, es dauerte allerdings noch einige Jahrzehnte bis die Forschungssituation in Österreich ebenfalls an das internationale Niveau aufschließen konnte.

Gründung des Instituts für Atomphysik 1967

Das heutige Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik ist ein Modellfall für diese Entwicklung in Österreich. Die Gründung dieses Institutes und die damit einhergehende Verbreiterung der Basis der Physik in Innsbruck ist der Weitsichtigkeit und Vision von Cap und Steinmaurer zu verdanken. Unter Weitsichtigkeit meine ich, dass zum damaligen Zeitpunkt die Institutsgliederung in Europa nach der Arbeitsmethode erfolgte, d.h. es gab Institute für Experimentalphysik und Institute für Theoretische Physik: hier wurde erstmals ein Institut für ein physikalischen Fach angestrebt, und zwar der Atomphysik. Unter Vision meine ich, dass als Fachgebiet das Gebiet der Atomphysik ausgewählt wurde, wobei angedacht war, unter diesem Sammelbegriff „Atom“, nicht nur die damals in aller Munde befindliche Kernphysik (die Entwicklung der Atombomben und die friedliche Nutzung der Kernenergie waren gerade erst in vollem Gange) damit in Innsbruck zu etablieren, sondern auch Aspekte der

Atomhülle mit einzubeziehen, also die Physik der Hülle und die damit verwandte Molekülphysik. Es war dann ein schöner Zufall, bzw. eine gezielte Einsicht, dass als erster Ordinarius des zu gründenden neuen dritten Physik Institutes in Innsbruck ein Wissenschafts- und Alpin-Kollege der damaligen Chemieordinaria Erika Cremer, und zwar der in der Kernphysik, aber auch in der Molekülphysik und Plasmaphysik (und damit auch an der Nahtstelle zwischen Physik und Chemie) erfahrene Maximilian Pahl, nach Innsbruck berufen wurde. Die daraus für viele Jahre resultierende kongeniale Zusammenarbeit zwischen den Arbeitsgruppen von Cap (der sich zu dieser Zeit bereits einen international anerkannten Namen als theoretischer Plasmaphysiker gemacht hatte) und Pahl führte letztendlich dann auch dazu, dass Innsbruck zu einem Mekka der Plasmaphysik wurde.

O.Univ.Prof. Dr. Maximilian Pahl, der bei dem Nobelpreisträger George de Hevesy (1943) in Freiburg 1931 promovierte und selbst durch die Entdeckung der Radioaktivität des Samariums in die Nähe eines Nobelpreises kam, war als (deutscher) Akademischer Weltmeister im Abfahrtslauf in Gstaad 1931 natürlich prädestiniert dazu, eine Professur im Herzen der Alpen anzunehmen. Während des Krieges arbeitete er mit Werner Heisenberg und Wolfgang Paul an dem deutschen Uranprogramm und kam dadurch von der Kernphysik aus auch erstmals mit der Massenspektrometrie und anderen Fragestellungen der Plasmaphysik in Berührung. Nach dem Krieg gelang es Pahl, mittels Ionenextraktion aus Niederdruck-Plasmen eine Reihe von Ionen-Molekül-Reaktionen quantitativ zu untersuchen. Mit 58 Jahren übernahm er mit Wintersemester 1966/67 das Ordinariat für Atomphysik an der Universität Innsbruck und leitete das mit Wintersemester 1967/68 den Betrieb aufnehmende Institut für Atomphysik bis zu seiner Emeritierung im Jahre 1978.

Die Institutsgründung 1967 und die Anfangszeit waren - wie sollte es anders sein - von Ressourcenknappheit geprägt; die zu dieser Zeit aus allen Nähten platzende Universität Innsbruck mietete daher eine 4-Zimmer Wohnung in der Müllerstraße 23, 1. Stock, bestehend aus Chefzimmer, Sekretariat (die ehemalige Küche), Bibliothekszimmer, Assistentenzimmer, Seminarraum und Abstellraum an. Pahl zog im Herbst 1967 in diese Räume ein, und zwar mit einer Sekretärin (Monika Heigl), einem Universitätsassistenten (Dr. Franz Howorka), zwei wissenschaftlichen Hilfskräften (die Studenten Fritz Egger und Werner Lindinger), dem Mechaniker Adolf Schaffner und der Reinigungsfrau Thieser. Einem sportlichen Großereignis und Glücksfall, nämlich den olympischen Winterspielen 1964, verdankte dann das Institut seine ersten Laborräumlichkeiten. Das Pressezentrum der olympischen Spiele wurde als Gebäude für die „Neue Chemie“ konzipiert, und nach Auszug der chemischen Institute aus dem Gebäude der „Alten Chemie“ in der Peter Mayrstraße 1a und entsprechender, teilweise durch die Assistenten im Herbst 1967 und im Laufe des Jahres 1968 selbst durchgeführter Adaptierung konnte das Institut für Atomphysik im Frühjahr 1966 im Parterre dieses Gebäudes einziehen (im wesentlichen vier ca. 10 - 20 m² Labors und zwei kleine Werk-

stätten). Ich selbst war zu der Zeit von Professor Pahl, der mich im Rigorosum als vierter Prüfer (aus Atomphysik) kennen gelernt hatte, angesprochen worden, ob ich nicht Lust hätte, beim Aufbau des Institutes für Atomphysik mitzumachen. Keine einfache Entscheidung, da ich auch ein Angebot aus der medizinischen Fakultät hatte, und dort war die Ausstattung wesentlich besser. Im Sommer 1968 hatte damit das Institut seine Sollgröße erreicht, 1 Professor, 2 Assistenten, 2 wissenschaftliche Hilfskräfte, 3 nichtwissenschaftliche MitarbeiterInnen, und es begann ein langer Weg der Entwicklung, der 1994 darin gipfelte, dass das Institut in einem der ersten in Österreich von der Zeitschrift "profil" durchgeführten Ranking zum besten Institut Österreichs gewählt wurde.

Zu Beginn meiner Tätigkeit herrschte gähnende Leere in den Labors, und die versprochenen Investitionsmittel aus dem Ministerium in Wien flossen nur langsam (Pahl emeritierte 1978 ohne jemals seine zugesagten Berufungsmittel aus Wien zur Gänze erhalten zu haben). Diese Situation - leere Experimentierräume - veranlassten mich daher, zwischenzeitlich für fast zwei Jahre als Max-Kade-Fellow in die USA zu gehen. Meine Rückkehr aus den USA erfolgte dann vorzeitig, da mich Pahl anrief und mitteilte, dass nunmehr das Ministerium die Anschaffung seines „Forschertraums“ zugesagt habe und das erste kommerzielle „Doppelfokussierende Zweisektorfeld-Massenspektrometer“ für 2,8 Mio öS bestellt sei. Es dauerte nach meiner Rückkehr dann doch noch fast ein Jahr, bis dieses weltweit einzigartige Gerät, genannt CH5-DF von der Firma MAT Atlas (Bremen), 1972 geliefert wurde und diesem Gerät in einer zweijährigen, mühsamen und zeitaufwändigen Experimentierphase alle Kinderkrankheiten ausgetrieben werden konnten (das Gerät ist nach vielen Umbauten und Verbesserungen auch heute noch erfolgreich im Einsatz, z. B.: I. Mähr, F. Zappa, S. Denifl, D. Kubala, O. Echt, T. D. Märk, P. Scheier, *Physical Review Letters* **98** (2007) 023401-4). Nach entsprechenden Versuchsaufbauten konnten dann 1974 erste Messungen durchgeführt werden, deren Ergebnisse dann unter anderem 1976 von T.D. Märk auch zur ersten Habilitation am Institut genutzt wurden; in der Folge habilitierten sich W. Lindinger 1977 und F. Howorka 1978. Weitere, auch externe Habilitationen folgten, u.a. Hanspeter Helm 1978, Roman Schrittwieser 1990, Herwig Paretzke 1999, Matthias Lezius 1999 und Sara Matt-Leubner 2005; ehemalige Absolventen sind inzwischen Universitätsprofessoren im In- und Ausland: z.B. Erminald Bertel, Kurt Stephan und Wolfgang Freysinger in Innsbruck, Emmerich Bertagnoli und Herbert Störi in Wien, Hannspeter Helm in Freiburg, oder Stefan Matejcek in Bratislava.

Ein wichtiger Faktor auf dem langen, letztendlich sehr erfolgreichen Weg der Entwicklung war die mit der Institutsgründung zeitgleich erfolgte Installation des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (kurz FWF) in Wien. Das erste Forschungsprojekt am Institut (neben dem Aufbau der Hauptvorlesungen und den dazugehörigen Diasammlungen) war einer kernphysikalischen Fragestellung gewidmet, die mit relativ bescheidenen Mitteln durchgeführt werden konnte, wobei die einzige am Anfang ins Gewicht fallende Investition ein

hochauflösendes Reichert-Zetopan-Lichtmikroskop und ein Tiegelofen darstellte, die 1969 aufgrund eines ersten FWF-Projektes (Projekt Nr. 839: AS 60 000) angeschafft werden konnten und auch zur ersten Publikation am neu gegründeten Institut führten: E. Märk, M. Pahl and T.D. Märk, "Fission Track Alter von Durango Apatit", *Contr. Min. Petr.* **32** (1971) 147; gefolgt von einer Arbeit aus dem Plasmabereich: T. D. Märk, W. Lindinger, F. Howorka, F. Egger, R. N. Varney und M. Pahl, "A simple bakeable hollow cathode device for the direct study of plasma constituents", *Review Scientific Instruments* **43** (1972) 1852.

Parallel zu den kernphysikalischen Untersuchungen fallen in diese Zeit erste Untersuchungen zur Elektronenstoßionisation mithilfe des CH₅-DF (AG Märk: K. Stephan, W. Ritter, E. Hille), zur Kinetik von positiven und negativen Ionen in stationären Hohlkathodenentladungen (AG Howorka: W. Lindinger, H. Helm, V. Gieseke, I. Kuen), in raumfesten Abklingplasma (AG Märk: H. Störi, M. Grössl, M. Langenwalter) und in Driftröhren (AG Howorka/Lindinger: E. Alge). Die erste am Institut für Atomphysik durchgeführte Dissertation mit dem Titel „Massenspektrometrie am negativen Glimmlicht einer zylindrischen Hohlkathode“ unter Verwendung des oben erwähnten Pahlschen 60°-Massenspektrometers führte im Juli 1972 zur Promotion von Werner Lindinger und dessen Anstellung als Assistent.

In diese Zeit des ersten Aufbaues zu Beginn der 70er Jahre fallen bereits erste große FWF-Projekte auf dem Gebiet der Plasmaphysik und der Gaselektronik. Diese Projekte, die dabei gewonnenen Erfahrungen, das aufgebaute Know-how und vor allem auch die wissenschaftliche Reputation legten den Grundstein zu einer zusammen mit dem Institut für Theoretische Physik unter der Leitung von Prof. Ferdinand Cap initiierten Schwerpunktbildung Plasmaphysik in Innsbruck. Die Förderung der Plasmaphysik in Innsbruck durch den FWF in den beiden Förderperioden 1973-1978 und 1978-1983 im Rahmen des Schwerpunktprogrammes der Rektorenkonferenz führen zu einem enormen Aufschwung der Plasmaphysik in Innsbruck und im speziellen der experimentellen Gruppen am Institut für Atomphysik.

In diese Zeit fällt außerdem das Angebot der Universität, die Wohnung in der Müllerstr. 23 durch Räumlichkeiten im Canisianum in der Karl Schönherrstr. 3 zu ersetzen. Trotz der wesentlich größeren Distanz zu den Labors (quer durch die Stadt) entscheidet sich der „Institutsrat“ beim üblichen Kaffee um 10 Uhr, dieses Angebot anzunehmen und im WS 1976/77 die Büros des Institut für Atomphysik zu übersiedeln, da durch das Vorhandensein von wesentlich mehr Räumen für Mitarbeiter und Studierende inklusive eines schönen Seminarraums die extrem beengte Situation endlich verbessert wird.

Die zweiten 10 Jahre: Schließung und Neugründung

Das 1967/68 gegründete Institut für Atomphysik wurde nach Emeritierung von Maximilian Pahl mit Wirkung vom 1.10.1978 geschlossen und dem Institut für Experimentalphysik

eingegliedert, da kein ordentlicher Universitätsprofessor die Institutsleitung übernehmen konnte und auch die nachfolgende Nachbesetzung letztlich nicht positiv abgeschlossen werden konnte (Verhandlungen mit Arendt Niehaus und Christian Ottinger scheiterten an entsprechenden Förderzusagen seitens des Ministeriums). De facto wurde im Sommer 1982 die vakante Lehrkanzel für Atomphysik vom Bundesministerium für Wissenschaft ersatzlos eingezogen. Ein weiterer schwerer Schlag erfolgte ein Jahr später, indem der Forschungsschwerpunkt Plasmaphysik, trotz hervorragender Ergebnisse und internationaler Sichtbarkeit und Anerkennung (einer der Absolventen, Prof. Karl Lackner wird im Jahre 2000 zum Leiter der unter dem "European Fusion Development Agreement" (EFDA) zusammengeschlossenen europäischen Fusionsforschung berufen) durch einen Grundsatzbeschluss („dass bestehende Schwerpunkte ohne Rücksicht auf erbrachte Leistung nicht weiter gefördert werden sollen“!) der Rektorenkonferenz von einer Bewerbung zur Teilnahme am dritten Schwerpunktprogramm 1984-1988 ausgeschlossen wird.

Nicht nur wegen der räumlichen Trennung zu den übrigen Institutsteilen des Institutes für Experimentalphysik, sondern vor allem durch die organisch gewachsenen Arbeitsgruppen im ehemaligen Institut für Atomphysik und deren enge Zusammenarbeit hat dieser Institutsteil aber auch in dieser schwierigen Periode seine Eigenständigkeit bewahrt. Aufgrund der damaligen Gesetzlage wurden 1980 nach entsprechendem Verfahren alle drei habilitierten Universitätsassistenten, Franz Howorka, Werner Lindinger und Tilmann Märk, am Institut für Experimentalphysik zu Ao. Univ.-Professoren (nach § 33 des UOG 1975) und Werner Lindinger und Tilmann Märk im Rahmen des UOG 1993 zum Univ.-Prof. ernannt.

Eine weitere wesentliche Verbesserung der Situation entsteht im Herbst 1985 durch die Fertigstellung des Neubaus „Viktor-Franz-Hess Haus“ in der Technikerstr. 25. Da die räumliche Beengtheit in den ehemaligen Chemieräumen in der Peter Mayrstr. 1a zum Schluss unerträglich geworden war, darf dieser Teil des ehemaligen Institutes Atomphysik als erste Einheit mit Sondergenehmigung des zuständigen Ministerialrates in die ebenerdigen (und damit tragfesten) Labors an der Technikerstr. 25 übersiedeln. Die traditionelle Weihnachtsfeier findet in diesem Jahr in den gerade bezogenen Laborräumen statt, der mit Naturkerzen ausgestattete Weihnachtsbaum führt zu einem ersten Einsatz der Feuerwehr in den neuen Gebäuden, die Feuermelder sind überempfindlich. Kurz vor der Übersiedlung der gesamten Physik und Mathematik im Frühjahr 1986 kommt es noch zu einer überraschenden Umplanung der Benutzungssituation, das Ministerium beschließt kurzfristig, Teile der Biologie im Viktor-Franz-Hess Haus unterzubringen, wodurch es einerseits zu stärkeren Einschränkungen kommt, und auch genau geplante Räume anderen Bestimmungen zugeführt werden. Unter anderem zieht der Institutsteil ehemalige Atomphysik aus dem Canisianum statt in den 5. Stock (ausgestattet mit Büromöbeln) in den 3. Stock (ausgestattet mit Laboreinrichtung !!) ein. Insgesamt stehen aber dem Institutsteil ehemaliges Institut für Atomphysik nunmehr ca.

1200 m² im Viktor-Franz-Hess Haus zur Verfügung: immerhin in etwa das Doppelte des bisherigen und noch dazu an einem gemeinsamen Standort.

Kurz nach diesem Umzug kommt es zu einer für das weitere Institutsleben wichtigen Entscheidung in Wien: Mit Wintersemester 1987/88 wird - nach langem und intensivem Bemühen durch die Institutsmitglieder (allen voran Ao.Univ.-Prof. Dr. Werner Lindinger) und durchaus gegen den Widerstand manches Kollegen - das ehemalige Institut für Atomphysik mit Beschluss des Bundesminister für Wissenschaft und Forschung als Institut für Ionenphysik neu errichtet. Univ.-Prof. Dr. Werner Lindinger wird erster Institutsvorstand; er bleibt dies bis 1993. Univ.-Prof. Dr. T.D. Märk übernimmt dann dieses Amt bis zur Zusammenlegung des Institutes für Ionenphysik mit dem Institut für Angewandte Physik Ende 2005. Neben em. Univ.-Prof. Dr. Max Pahl und den drei Professoren Franz Howorka, Werner Lindinger und Tilmann Märk werden Frau Monika Heigl (Sekretariat) und Herr Wilfried Gapp (Werkstatt) dem wieder errichteten Institut zugeordnet.

Das Institut für Ionenphysik 1988 - 1997: erste Blütezeit

Nach dieser ‚zweiten‘ Institutsgründung kommt es zu einem enormen Aufblühen der Aktivitäten am Institut für Ionenphysik, ein Motivationsschub bei allen MitarbeiterInnen führt zu verstärkter Lehrtätigkeit (Hauptvorlesungen, Spezialvorlesungen aus Kernphysik, Atomphysik, Molekülphysik, Plasmaphysik, Gaselektronik, Festkörperphysik, Clusterphysik, Oberflächenphysik, Reaktionskinetik, Umweltphysik, Massenspektrometrie, Spektroskopie und Laserphysik, Messtechnik, Vakuumphysik, sowie diverser Praktika und Seminare) und vor allem zu erhöhter Forschungsleistung, was sich auch zahlenmäßig niederschlägt. Alleine im Zeitraum 1986-1990 entstehen 81 Originalarbeiten in referierten Fachzeitschriften, es werden 1.490.000 öS an Drittmitteln eingeworben, 13 Diplomarbeiten und 7 Dissertationen fertig gestellt. Die Forschungsgebiete zu dieser Zeit umfassen eine Arbeitsgruppe für Ionen-Molekül-Reaktionen (Prof. Lindinger: Interstellare Molekülsynthese, thermodynamische Daten für Ionen, Gasanalyse durch Ionen-Molekül-Reaktionen in Kombination mit Massenspektrometrie), eine Arbeitsgruppe Clusterphysik und Massenspektroskopie (Prof. Märk: Untersuchung der Erzeugung, Struktur, Stabilität von Clusterionen, Untersuchung der Elektronenstoßionisation) und eine Arbeitsgruppe Spektroskopie, Ionen-Molekül Stöße und Laserphysik (Prof. Howorka: Spektroskopie von Gasentladungen, Laserphysik). Durch eine glückliche Fügung kommt im Jahr 1990 eine weitere Arbeitsgruppe für Plasmaphysik dazu, die damit das Forschungsgebiet der Ionenphysik abrundet: Univ.-Doz. Dr. Roman Schrittwieser wechselt auf eigenen Wunsch mit seiner experimentellen Plasmaphysikgruppe am Institut für Theoretische Physik zum Institut für Ionenphysik, er beschäftigt sich mit plasmaphysikalischen Experimenten an einer Q- bzw. DP- Maschine, insbesondere mit Plasmastabilitäten (vgl. folgendes Kapitel 3.3.2).

Im selben Jahr kommt es aber auch zu einem tragischen Unglück und Verlust für das Institut: Ao.Univ.-Prof. Dr. Franz Howorka wird von einem betrunkenen Autofahrer überfahren und erliegt seinen schweren Kopfverletzungen einige Tage später. Der Schock sitzt tief, und erst langsam kann das Institut wieder Tritt fassen. Prof. Märk führt die Projekte von Prof. Howorka zu Ende, er betreut dessen DissertantInnen bis zu ihrem Abschluss. Die Arbeitsgruppe Spektroskopie und Laserphysik muss geschlossen werden, da keine Ersatz-Professorenstelle dem Institut zur Verfügung gestellt wird.

Auf Initiative des Vorsitzenden der ÖGP, Herrn o.Univ.-Prof. Dr. Hannspeter Winter, und unter Unterstützung durch den Bundesminister für Wissenschaft und Forschung findet im Zeitraum September 1990 bis September 1991 eine Evaluierung der physikalischen Forschung an den 53 Instituten der österreichischen Universitäten bzw. außeruniversitären Forschungseinrichtungen statt. Die Empfehlung der internationalen Kommission auf Einrichtung zweier weiterer Assistentenstellen hat in all den folgenden Jahren allerdings nichts gefruchtet. Die einzige zusätzliche Stelle am Institut kam dadurch zustande, dass im Wintersemester 1999/2000 Herr Univ.Do. Dr. Michael Probst auf eigenen Wunsch vom Institut für Allgemeine, Anorganische und Theoretische Chemie an das Institut für Ionenphysik wechselte. Dieser Wechsel war für das Institut für Ionenphysik ungemein fruchtbringend, da mit Probst ein theoretischer Quantenchemiker kongenial die experimentell arbeitenden Gruppen, vor allem von Märk und Scheier ergänzte. Dies führte in der Folge zu vielen „firsts“ in Phys. Rev. Letters und Angewandte Chemie International Edition, den beiden top Zeitschriften in Physik und Chemie. Es kann hier auch vermerkt werden, dass die Stellen der beiden verunglückten Professoren, Franz Howorka (1990) und Werner Lindinger (2001) erst mit großer Verzögerung und nur nach vielen Interventionen jeweils als Assistentenstellen nachbesetzt werden konnten, die Stelle ex-Howorka 1994 mit Dr. Paul Scheier (Habilitation 1994) und die Stelle ex-Lindinger erst 2006 mit Dr. Armin Wisthaler. Dr. Armin Hansel (Habilitation 2002) erhielt 1995 die im Bericht der Kommission noch als nicht-permanent vermerkte Universitätsassistentenstelle.

Trotz dieser nicht geraden idealen Umstände, gelingt es den Professoren Lindinger und Märk, das Institut zusammen mit den drei Assistenten (Armin Hansel, Paul Scheier und Roman Schrittwieser) in den folgenden Jahren an die österreichische Spitze zu führen. Auf Basis einer der ersten in Österreich durchgeführten Rankings meldet die Zeitschrift "profil" 1994, dass das Institut für Ionenphysik der Universität Innsbruck die Liste der Top 20 Institute Österreichs anführt. Als Datenbasis für die Rangliste dienten die von den Institutsvorständen für das Ministerium veröffentlichten Arbeitsberichte 1991 und 1992. Insgesamt 15 Kriterien eines umfangreichen Fragebogens wurden zur Bewertung herangezogen. Dieses Ergebnis ist umso bedeutender, als die Physik Innsbruck 1994 als Studienrichtung nur Platz 21 in der österreichweiten Rangliste einnimmt (1993 war sie noch auf Rang 6 gelegen). Interessant aus

heutiger Sicht ist, dass die Universität Innsbruck damals in der Startphase des UOG 93 als Gesamteinstitution nur den 5. Platz einnahm (bei den heutigen internationalen Rankings in Zeiten des UG 2002 ist es konsistent der 2. bzw. 3. Platz).

1998-2008: Weitere Entwicklung und Zusammenlegung mit dem Institut für Angewandte Physik

Die letzten zehn Jahre sind von mehreren Trends geprägt. Einmal kommt es am Institut für Ionenphysik zu einer sehr starken Ausweitung der drittmittelfinanzierten MitarbeiterInnen (finanziert durch viele FWF, ÖNB, EU, NSF und Euratom Forschungsprojekte), teilweise sind bis zu 30 drittmittelfinanzierte DoktorandInnen und Postdoc am Institut für Ionenphysik beschäftigt, damit einhergehend steigt (i) die Anzahl der Publikationen in hochrangigen Fachzeitschriften (alleine die AG Märk/Scheier erreicht ca. 100 Impaktfaktorpunkte pro Jahr, im Jahr 2003 sogar 127) und (ii) auch die Anzahl der Doktoratsabschlüsse. Ab 2000 steht durch eine glückliche Fügung dieser starken Ausweitung auf studentischer Seite eine zusätzliche Assistentenstelle zur Verfügung (i.e. Herr Ao.Univ.-Prof. Dr. Michael Probst mit dem Fachausrichtung Computational Chemistry). Damit besteht zu diesem Zeitpunkt das wissenschaftliche Team aus zwei Professoren (Lindinger, Märk) und vier Mittelbauangehörigen (die Ao.Univ.-Professoren Hansel, Probst, Scheier, Schrittwieser), ergänzt wird dieses Team durch eine Reihe von Honorarprofessoren, die regelmäßig das Institut in Lehre und Forschung unterstützen, i.e. Prof. Kurt Becker (New York), Prof. Hans Deutsch (Greifswald), Prof. Olof Echt (Durham), Prof. Zdenek Herman (Praha) und Prof. Alex Stamatovic (Beograd).

Sowohl in der AG Lindinger als auch in der AG Märk kommt es im Rahmen dieser intensivierte Forschungsaktivitäten zu neuen Entwicklungen auf dem Gebiet der Grundlagenforschung. Die AG Lindinger/Hansel steigt vermehrt in das Gebiet der Umweltphysik ein, und zwar ausgehend von der institutseigenen Entwicklung eines weltweit einmaligen Gasanalysegerätes, das es erlaubt, Untersuchungen in Echtzeit und mit hoher Empfindlichkeit von chemischen Prozessen in der Atmosphäre, insbesondere der Troposphäre, durchzuführen. Ein besonders schönes Beispiel ist die mit dem Nobelpreisträger Professor Paul Crutzen gemeinsam durchgeführte Messkampagne zur Untersuchung der Ursachen der Luftverschmutzung über dem indischen Ozean, siehe J. Lelieveld, P. J. Crutzen et al., *The Indian Ocean Experiment: Widespread Air Pollution from the South and Southeast Asia*, *Science* 291 (2001) 1031. In der AG Märk/Scheier verlagert sich die Clusterforschung einerseits auf die Erforschung der Eigenschaften der Fußballmoleküle (Fullerene), u.a. auch begünstigt durch eine Kollaboration mit dem späteren Nobelpreisträger Sir Harry Kroto, der zu einem sehr frühen Zeitpunkt Proben von C_{60} zur Verfügung stellen kann, und andererseits wendet sich diese AG zunehmend Fragestellungen in Zusammenhang mit der Elektronenstoßwech-

selwirkung an Biomolekülen zu (Mechanismus von Strahlenschäden). Auch die Wechselwirkung von Ionen mit Oberflächen wird ein neues sehr tragfähiges Arbeitsgebiet, das sowohl Grundlagen- als auch Anwendungscharakter hat.

Zum anderen wird neben der reinen Grundlagenforschung (auf dem Gebiet der Massenspektrometrie, Gaselektronik, Plasmaphysik, Oberflächenphysik und Atmosphärenphysik) auch zunehmend angewandte Forschung betrieben. So sind die beiden Arbeitsgruppen Märk/Scheier und Schrittwieser bereits bei der Gründung der österreichischen Assoziation Euratom-ÖAW für Fusionsforschung in 1986 dabei und tragen wesentlich zum Physikprogramm der Assoziation bei: einerseits in der AG Märk/Scheier zum Thema „Electron impact ionization and surface induced reactions of edge plasma constituents“ und andererseits in der AG Schrittwieser zum Thema „Electrostatic turbulence in plasmas - development of probes for fusion plasmas“. Damit wurde und wird vom Institut ein wichtiger Beitrag zur europäischen Fusionsforschung und letztlich zum Start des ITER-Projektes geleistet. Der anwendungsbezogene Forschungsbereich im Bereich der Plasmaphysik wurde aber in den letzten 10 Jahren auch verstärkt durch die Mitarbeit von Herrn Ao.Univ.-Prof. Dr. Hans Pulker, der ursprünglich in verschiedenen Forschungslabors der Fa. Balzers AG für Hochvakuumtechnik und Dünne Schichten tätig war und sich an der LFUI habilitierte. Er leitet als freier, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Ionenphysik die AG Technologie Dünner Schichten (vgl. Kap. 5.7).

Auch die AG Lindinger wendet sich in diesen Jahren vermehrt anwendungsbezogenen Themen zu, wobei Werner Lindinger mit einigen Institutsangehörigen – ausgehend von reiner Grundlagenforschung über die Eigenschaften von Ionen-Molekül-Reaktionen – 1998 die Spin-off Firma Ionicon Analytik gründet, in der Geräte basierend auf dem Prinzip der Protonentausch-Reaktions-Massenspektrometrie zur Gasanalyse entwickelt und hergestellt werden. Einige Jahre später sollte unter der Federführung von Armin Hansel Oktober 2004 die Gründung des spin-off Forschungsunternehmens Ionimed Analytik (die sich mit medizinischen und biotechnischen Anwendungen der PTR-MS Methode beschäftigt) folgen. Die Entwicklung dieser Firma, aber auch der Institutsbetrieb erleiden 2001 eine jähe Zäsur: während eines Forschungsaufenthaltes auf Kauai, Hawaii, zur Messung von Schadstoffen, die aus China über den pazifischen Ozean transportiert werden, verunglückt Werner Lindinger beim Schwimmen im pazifischen Ozean tödlich. Sowohl die Spin-off Firma (es sieht eine Weile nach Schließung aus) als auch das Institut werden dadurch kurzfristig in ihrer Existenz bedroht (es wird wieder von Eingliederung in das Institut für Experimentalphysik gesprochen). Nach dem anfänglichen Schock und Trauer gelingt es aber, den Fortbestand beider zu sichern. Kurzfristig übernimmt Prof. Märk die AG Lindinger, ab seiner Habilitation 2002 führt dann der ehemalige Assistent von Lindinger, Herr Ao.Univ.Prof. Dr. Armin Hansel, diesen Arbeitsbereich sehr erfolgreich weiter.

Kurz darauf wird Prof. Märk von der Professorenkurie der Physik bzw. von der Naturwissenschaftlichen Fakultät gebeten, von 2001 bis 2003 den Vorsitz der Fachgruppe Physik und den Vorsitz der naturwissenschaftlichen Fakultät in der kritischen Anfangsphase der Einführung des UOG 93 in Innsbruck zu übernehmen. In der Folge wird Prof. Märk von Rektor Univ.-Prof. Dr. Manfred Gantner zum Vizerektor für Forschung designiert und vom Universitätsrat für die Periode 2003-2007 bestellt, im Zeitraum in dem das UG 2002 erstmals implementiert wird. Dadurch kommt es neuerlich zu einem personellen Engpass am Institut, der zum Teil durch vermehrten Besuch von Gastprofessoren (z.B. Prof. Olof Echt, Prof. Kurt Becker, die beide in der Folge zu Honorarprofessoren ernannt werden) und die Zuweisung einer Kat.1-Stelle, die sich Frau Dr. Verena Grill und Herr Dr. Armin Wisthaler, teilen, gemildert werden kann. Nach Ausscheiden von Dr. Grill im Jahre 2006 und nach Zuerkennung einer Kat.1 Stelle als Ersatz für die ex-Lindinger Professur, die an Dr. Wisthaler vergeben wird, übernimmt Dr. Fabio Zappa bis Ende 2007 diese Kat.1-Stelle von Dr.Grill. Da außerdem Ao.Univ.-Prof. Dr. Paul Scheier im Frühjahr 2007 auf der „Short list“ für die Position eines Direktors eines Max Planck Institutes in Heidelberg steht, genehmigt Rektor Manfred Gantner die Ausschreibung einer §99 Professur am Institut, um die Fortführung des Arbeitsbereiches Märk/Scheier zu gewährleisten. Prof. Paul Scheier bewarb sich erfolgreich auf diese Stelle und besetzt die dabei im Rahmen der Berufungsverhandlungen zugesagte Kat.1 Stelle mit Dozent Dr. Alexander Kendl, der für theoretische Plasmaphysik habilitiert ist. Dadurch kommt es zu einer essentiellen und richtungweisenden Verstärkung der Plasmaphysik am Institut.

Eine gravierende Entwicklung für das Institut für Ionenphysik tritt mit Jahresende 2005 ein. Den Vorstellungen von Rektor Manfred Gantner folgend (basierend auf dem Entwicklungsplan der Fachgruppe Physik) und nach Anhörung des Senats beschließt der Universitätsrat Ende 2005 eine Änderung des Organisationsplanes (siehe Mitteilungsblatt der Universität Innsbruck am 2. Jänner 2006). Im Rahmen dessen werden das Institut für Ionenphysik und das Institut für Angewandte Physik zu einem einzigen Institut zusammengelegt, i.e. nunmehr „Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik“ genannt. Erster Leiter dieses Institutes, in dem auch angewandte und wirtschaftsnahe Forschung angesiedelt ist, wird Herr o.Univ.-Prof. Dr. Erwin Hochmair, ab Oktober 2008 übernimmt Univ.-Prof. Dr. Paul Scheier die Geschicke dieses Institutes. Auf ihn warten große Herausforderungen, da beide Professorenstellen (Hochmair und Märk) mit WS 2009/2010 neu besetzt werden müssen und Prof. Märk vom Nachfolger Gantners, Rektor o.Univ.-Prof. Dr. Karlheinz Töchterle, für eine weitere Periode 2007-2011 als Vizerektor für Forschung bestellt wird.

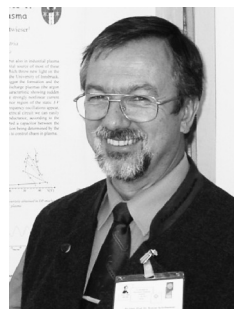
(Quelle: Aktualisierter Auszug aus der Festschrift "40 Jahre Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik". innsbruck university press, 2007)

3.3.2 Experimentelle Plasmaphysik

Ao. Univ.-Prof. Hon.-Prof. Dr. Roman Schrittwieser

Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, Universität Innsbruck

Seit den Anfängen der Plasmaphysik in Innsbruck waren etwa 10 Jahre vergangen, als Univ.-Prof. Dr. Ferdinand Cap vom Institut für Theoretische Physik den Entschluss fasste, in Innsbruck auch ein Labor für experimentelle Plasmaphysik zu gründen. Dieses sollte ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsschwerpunktes Plasmaphysik des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung sein, der Ende der 1960-er Jahre in Innsbruck ins Leben gerufen wurde und bis in die 1980-er Jahre immer wieder verlängert wurde. Im Jahre 1968 war außerdem an der Universität Innsbruck das Institut für Atomphysik gegründet worden, zu dessen Vorstand Univ.-Prof. Dr. Maximilian Pahl berufen worden war, und dessen 40-jähriges Bestehen Anfang 2008 ebenfalls gefeiert wurde.



Prof. Cap konnte für die Teilnahme am Forschungsschwerpunkt Plasmaphysik auch die damaligen Vorstände der Institute für Atomphysik, Univ.-Prof. Maximilian Pahl (gest. 1992), für Experimentalphysik, Univ.-Prof. Josef Kolb (gest. 1994) und für Informatik, em. Univ.-Prof. Rudolf Albrecht gewinnen. Für das Innsbrucker Plasmalabor konnte in den damaligen Laborräumlichkeiten des Institutes für Atomphysik in der Peter-Mayr-Straße ein Raum gefunden werden. Die experimentelle Leitung des Labors übernahm Prof. Maximilian Pahl, die theoretische Leitung Prof. Cap.

Die erste Zeit bis 1980: die Innsbrucker Q-Maschine

Anfang der 1960-er Jahre hatten N. Rynn und N. D'Angelo am Princeton Plasma Physics Laboratory in New Jersey, USA, die erste sogenannte Q-Maschine gebaut. Im Gegensatz zu den üblichen Gasentladungsapparaturen wird in einer Q-Maschine (vom Englischen: Quiescent Plasma Machine) das Plasma nicht durch Elektronenstoßionisation im gesamten Gasvolumen sondern durch die gemeinsame Wirkung thermionischer Emission von Elektronen und Oberflächenionisation auf der sogenannten Heißen Platte erzeugt. Durch diesen Effekt entstehen einfach geladene Kalium- oder Cäsiumionen, die zusammen mit den Elektronen unser gewünschtes Plasma bilden, das mit Hilfe eines starken Magnetfelds eingeschlossen wird. Dieses Alkaliplasma hat gegenüber Gasentladungsplasmen den Vorteil, dass es praktisch stoßfrei ist. Ebenso ist dieses Plasma, wie der Name "Q-Maschine" ausdrücken soll, sehr "ruhig" und zeigt von sich aus nur wenige Fluktuationen oder Instabilitäten.

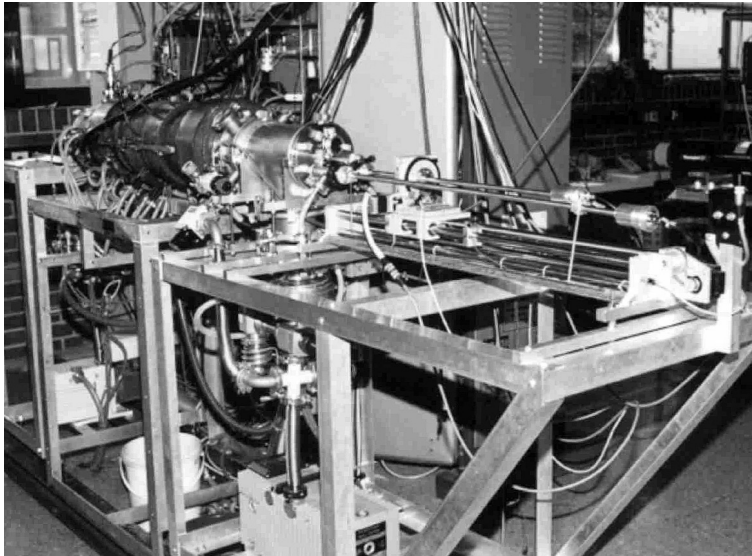


Abb. 3.3.2.1: Die Innsbrucker *Q*-Maschine im Labor in der Technikerstraße.

Nach der Erfindung der *Q*-Maschine wurden in den 1960-er Jahren an zahlreichen Plasma-physikforschungsinstituten auf der ganzen Welt *Q*-Maschinen gebaut. Dies geschah damals auch im Hinblick auf die Fusionsplasmaforschung, da ein *Q*-Maschinenplasma im Hinblick auf bestimmte Ähnlichkeitsparameter einem Fusionsplasma physikalisch ähnlich ist. Die Innsbrucker *Q*-Maschine (siehe Abb. 3.3.2.1) wurde in den Jahre 1969 bis 1972 in Innsbruck von den beiden Dissertanten Norman Schwaighofer und Wolfgang Stemberger aufgebaut. Im Jahre 1973 wurde Dr. Elmar Märk im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plasmaphysik mit der Leitung der Forschungsarbeiten an der Innsbrucker *Q*-Maschine betraut.

Im Jahre 1973 hatte ich am Institut für Experimentalphysik bei Prof. Josef Kolb über ein Thema aus der Ultraschallphysik promoviert. Da mich jedoch die Plasmaphysik, und hier insbesondere die Fusionsphysik, schon immer brennend interessiert hatte, nahm ich im Frühjahr 1973 das Angebot von Prof. Cap an, an seinem Institut die wieder frei gewordene Stelle eines sogenannten wissenschaftlichen Beamten zu übernehmen. Prof. Cap bot mir an, im Rahmen dieser Stelle wissenschaftlich am Innsbrucker Plasmalabor mitzuarbeiten. Somit ergab sich die ungewöhnliche Konstellation, dass ein experimentelles Labor, das räumlich zum Institut für Atomphysik gehörte, *de facto* jedoch von Mitarbeitern des Institutes für Theoretische Physik betrieben wurde. Es ist das große Verdienst von Prof. Cap, dass er auch im Rahmen der Innsbrucker experimentellen Plasmaphysik sofort intensive wissenschaftliche Beziehungen zu ausländischen Plasmaphysikinstitutionen mit ähnlichen Forschungsthemen anknüpfte. Eines der

ersten Institute, das ebenfalls über eine Q-Maschine verfügte, war das Department of Electronic Engineering der Tohoku-Universität in Sendai (Japan). Von diesem Institut kam in den Jahren 1973/74 Dr. Hideo Sugai zu uns. Im Jahre 1975 verbrachte auch sein damaliger Chef in Sendai, Prof. Noriyoshi Sato sechs Monate am Innsbrucker Plasmalabor.

Eine weitere Zusammenarbeit ergab sich im Jahre 1974 auf Initiative des Gründers der Plasmaphysikgruppe an der Physikalischen Fakultät der Alexandru-Ioan-Cuza-Universität in Iași (Rumänien), Prof. Mircea Sanduloviciu. Daraufhin besuchte Prof. Cap Ende 1974 die Plasmaphysikgruppe in Iași, was zu einem besonders intensiven und fruchtbaren wissenschaftlichen Austausch führte. Nach meinem eigenen ersten Besuch in Iași Ende des Jahres 1974 und dem ersten längeren Forschungsaufenthalt von Dr. Gheorghe Popa in Innsbruck, ebenfalls in der ersten Hälfte des Jahres 1975, rissen die ausgezeichneten Beziehungen zwischen den beiden Gruppen trotz großer Schwierigkeiten und der weitgehenden Isolierung Rumäniens gegen Ende der 1980-er Jahre nie ab. Prof. Dr. Gheorghe Popa verbrachte zahlreiche kürzere und längere Forschungsaufenthalte in Innsbruck, ebenso wie ich fast jedes Jahr mindestens einmal die Universität in Iași besuchte. Die Anzahl der gemeinsamen wissenschaftlichen Publikationen in Fachzeitschriften ist inzwischen auf 51 angewachsen.

Zusammen mit Dr. Elmar Märk und mir führten Prof. Sato und Dr. Popa im Jahr 1975 einige grundlegende und höchst interessante Forschungsarbeiten an der Innsbruck Q-Maschine durch, die auch die weitere Forschungsrichtung des Labors für viele Jahre bestimmten. In den Jahren 1975/76 ging Dr. Elmar Märk für zehn Monate an die Tohoku-Universität in Sendai, Japan, verließ jedoch bald nach seiner Rückkehr die Universität Innsbruck. Er ist nun schon seit vielen Jahren Direktor der Höheren Technischen Lehranstalt in der Innsbrucker Anichstraße. Somit wurde ich um das Jahr 1978 *de facto* Leiter des Innsbrucker Plasmalabors.

Eine weitere intensive und fruchtbare Zusammenarbeit begann im Jahre 1976 wiederum auf Initiative von Prof. Cap mit der Plasmagruppe am dänischen Forschungsinstitut Risø bei Roskilde in der Nähe von Kopenhagen, an der bis zum Anfang der 1990-er Jahre ebenfalls eine Q-Maschine betrieben wurde. Der erste längerfristige dänische Besucher in Innsbruck war im Frühjahr 1976 Jens Juul Rasmussen. Auch mit dieser Gruppe erfolgten daraufhin zahlreiche weitere gegenseitige Besuche, und die wissenschaftlichen Beziehungen intensivierten sich in den letzten Jahren auf dem Gebiet der Fusionsforschung wieder besonders stark, wobei nun auch Dr. Volker Naulin als Theoriespezialist mitwirkt.

Ich selber absolvierte meinen ersten längeren Forschungsaufenthalt an einem ausländischen Institut im Frühjahr 1977 in Risø. Weitere folgten in den Jahren 1980 und 1986. Die während dieser Aufenthalte an der Q-Maschine in Risø durchgeführten Forschungsarbeiten wurden in Innsbruck weitergeführt und führten zur Aufklärung des Mechanismus zweier wichtiger niederfrequenter Instabilitäten von extrem hoher Amplitude. Beide Instabilitäten werden durch

einen Elektronenstrom entlang der Plasmasäule hervorgerufen, und daher treten beide Instabilitäten auch in vielen anderen Fällen auf, wie z.B. in Gasentladungslaborplasmen, magnetisierten Fusionsplasmen und in der Magnetosphäre der Erde.

Eine dieser Instabilitäten ist die Potentialrelaxationsinstabilität, bei der periodisch eine Raumladungsdoppelschicht der Plasmasäule entlang läuft. Diese laufende Doppelschicht führt im Rhythmus von einigen kHz zum Stromzusammenbruch mit darauf folgender "Relaxation" des Plasmapotentials. Die andere selbsterregte Schwingung der Plasmasäule ist die elektrostatische Ionenzyklotroninstabilität, deren Mechanismus eine zweidimensionale Schwingung des Plasmapotentials darstellt. Im Kaliumplasma der Innsbrucker Q-Maschine tritt diese Instabilität typischerweise mit einer Frequenz von ca. 80 kHz auf. Die gemeinsam mit der Plasmagruppe in Risø durchgeführten Forschungsarbeiten führten im Jahre 1991 unter anderem auch zu einem eingeladenen Übersichtsartikel von Jens Juul Rasmussen und Roman Schrittwieser in den IEEE Transactions on Plasma Science.

Zu erwähnen ist hier auch der einjährige Besuch von Dr. Rikizio Hatakeyama vom Department of Electronic Engineering der Tohoku-Universität in Sendai in den Jahren 1977/78, der in der Innsbrucker Q-Maschine interessante Untersuchungen zur universellen und stromgetriebenen Driftinstabilität durchführte. Ende der 1970er Jahre begannen zwei neue Dissertanten mit ihrer Arbeit im Innsbrucker Plasmalabor: Erhard Mravlag und Michael Oertl, die beide im Jahre 1981 promovierten.

Die Zeit von 1980 bis 1990: die Innsbrucker DP-Maschine

Dr. Elmar Märk hatte von seinem Aufenthalt in Japan auch die Idee zu einer zweiten Plasmaapparatur für das Innsbrucker Plasmalabor mitgebracht, und zwar eine sogenannte DP-Maschine. Diese Abkürzung steht für Doppelplasma-Maschine, die Anfang der 1970-er Jahre von R.J. Taylor, D.R. Baker und H. Ikezi speziell für die Untersuchung nichtlinearer ionenakustischer Wellen entwickelt worden war. In einer DP-Maschine wird das Plasma durch eine Heißkathodengasentladung erzeugt, und es entsteht ein großvolumiges, relativ ruhiges und vor allem unmagnetisiertes Plasma. Der Ausdruck Doppelplasma-Maschine geht darauf zurück, dass eine große zylindrische Vakuumkammer durch ein feinmaschiges Gitter in zwei ungefähr gleich große Hälften geteilt wird.

Auf Grund der Vorschläge von Dr. Elmar Märk wurde die Innsbrucker DP-Maschine von mir mit einer Zylinderlänge von 90 cm und einem Durchmesser von 45 cm geplant (siehe Abb. 3.3.2.2). Der endgültige Aufbau der DP-Maschine wurde in den Jahren 1979 – 1981 von Dr. Michael Oertl, der nun als Forschungsassistent beim Forschungsschwerpunkt Plasmaphysik mitarbeitete, und mir durchgeführt. Dr. Oertl unternahm auch umfangreiche grundlegende Untersuchungen des Plasmas der Innsbrucker DP-Maschine.

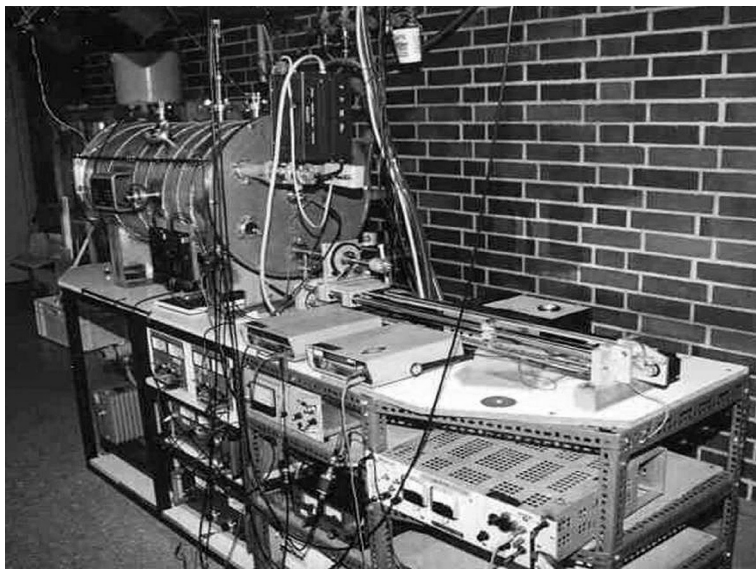


Abb. 3.3.2.2: Die Innsbrucker DP-Maschine im Labor in der Technikerstraße.

In diese Zeit fielen auch meine zwei wichtigsten Auslandsaufenthalte, nämlich von Juli bis September 1981 an der Tohoku-Universität in Sendai, wo ich bei der Plasmaphysikgruppe von Prof. Noriyoshi Sato arbeitete, und von Oktober 1981 bis September 1982 an der Universität von Kalifornien in Irvine, südlich von Los Angeles. Während beider Aufenthalte arbeitete ich an den dortigen Q-Maschinen und konnte besonders in Irvine umfangreiche und äußerst interessante Untersuchungen zur elektrostatischen Ionenzyklotroninstabilität durchführen. Diese Untersuchungen führte ich auch nach meiner Rückkehr an der Innsbrucker Q-Maschine erfolgreich weiter, während sich mein Mitarbeiter Dr. Oertl mehr der Innsbrucker DP-Maschine widmete. Unsere intensiven Zusammenarbeiten mit der Plasmaphysikgruppe an der Alexandru-Ioan-Cuza-Universität in Iași, Rumänien, sowie der Plasmaphysikgruppe in Risø, Dänemark, führten zu hochinteressanten Resultaten über die Mechanismen der beiden oben genannten Instabilitäten sowie von ionenakustischen Solitonen. So konnten Dr. Oertl und Dr. Popa zeigen, dass mit Hilfe einer bipolaren Wand eine mehrfache Reflexion von Solitonen erzielt werden kann. Im Herbst des Jahres 1984 erfolgte der Umzug der Labors des Institutes für Ionenphysik in das neue Institutsgebäude in der Technikerstraße 25. Auch im neuen Labortrakt erhielt das Innsbrucker Plasmalabor ein Zuhause. Anfang des Jahres 1986 zogen auch die eigentlichen Institute für Ionenphysik und Theoretische Physik in die Technikerstraße um. Einer der ersten Gäste am neuen Standort des Plasmalabors war im Jahre 1987 Dr. Satoru Iizuka wiederum von der Tohoku-Universität in Sendai (Japan).

Die Zeit von 1990 bis 1996 – Veränderung und Aufschwung

Auch meine persönliche Geschichte hatte nun Einfluss auf die Geschichte des Innsbrucker Plasmalabors, denn an sich war ich im Jahre 1989 bereits pragmatisierter "Oberrat des wissenschaftlichen Dienstes", und hätte mich daher gar nicht habilitieren müssen, um eine permanente Stelle zu erhalten, so wie das bei UniversitätsassistentInnen früher notwendig war. Dennoch habilitierte ich mich im Jahre 1990, und meine Stelle wurde daraufhin in die eines Universitätsdozenten umgewandelt mit gleichzeitiger Versetzung vom Institut für Theoretische Physik zum Institut für Ionenphysik. Damit hatte auch die ungewöhnliche und etwas heikle rechtliche Situation des Innsbrucker Plasmalabors, räumlich beim Institut für Ionenphysik, aber geleitet von einem Angehörigen des Institutes für Theoretische Physik, ihr Ende gefunden, womit sich auch die finanzielle Situation des Labors stark verbesserte.

Auf Grund der Habilitation konnte ich nun auch endlich DiplomandInnen und DissertantInnen betreuen, und so verbesserten sich die personelle Situation und die wissenschaftliche Produktivität des Innsbrucker Plasmalabors schlagartig. Zu den Diplomanden der ersten Stunde gehörten die Klaus Delueg, Armin Siebenförcher und Martin Zimmerling. Sehr bald gesellte sich auch der Post-doc Dr. Carsten Winkler zur Innsbrucker Experimentellen Plasmaphysikgruppe (IEPPG).

Ein in dieser Zeit immer wichtiger werdendes Teilgebiet der Untersuchungen des Innsbrucker Plasmalabor war die Plasmadiagnostik, wobei hier das Hauptaugenmerk auf Plasmasonden lag. Sonden haben nicht nur wegen ihrer einfachen Handhabung und geringen Kosten immer noch unschätzbare Vorteile gegenüber anderen wesentlich aufwändigeren und teureren diagnostischen Werkzeugen, sondern auch weil nur mit Sonden eine so gute räumliche und zeitliche Auflösung erzielt werden kann, auch wenn immer eine gewisse Störung des Plasmas durch die Sonde in Kauf genommen werden muss.

Auch auf dem Gebiet der Erforschung von Plasmasonden konnte das Innsbrucker Plasmalabor wertvolle Beiträge leisten. So besteht ein weiteres Problem von Sonden in der möglichen Verschmutzung der Sondenoberfläche, was zu einer Verzerrung der Strom-Spannungskennlinie und daher zu einer Verfälschung der berechneten Plasmaparameter führt. Dieses Problem ist in der Q-Maschine besonders zu beachten, da wir es dabei ja mit einem Kaliumplasma zu tun haben. Wir entwickelten daher verschiedene Sondentypen, die beheizbar waren, so dass das Kalium sofort von der Sonde wieder abdampft.

Um diese Zeit herum wurde auch die dritte Phase des Kohlenstoffs, nämlich das Fulleren- oder Fußballmolekül C_{60} entdeckt. Dieses Molekül hat eine sehr hohe Elektronenaffinität, das heißt, dass durch die Reaktion $C_{60} + e \Rightarrow C_{60}^-$ sehr einfach negative C_{60} -Moleküle erzeugt werden können. Diesen Effekt nutzten wir auch in der Innsbrucker Q-Maschine aus, um ein

Plasma zu erzeugen, das vor allem aus positiven Kaliumionen, negativen C_{60} -Moleküle und einigen Restelektronen besteht. Unsere Gruppe gehörte weltweit zu den ersten, denen in einer Q-Maschine die Erzeugung eines C_{60} -Plasmas gelang.

Während die ersten drei Diplomanden im Jahre 1994 ihre Sponsion feiern konnten, hatte die IEPPG weiteren Nachwuchs an DiplomandInnen erhalten. Darunter war Frau Daniela Strele, die im Jahre 1996 ihr Diplom abschloss und daraufhin sofort an ihrer Dissertation zu arbeiten begann. In ihren Arbeiten beschäftigte sich mit der Erzeugung und den Eigenschaften eines C_{60} -Plasmas. Außerdem verbrachte Frau Strele einen längeren Forschungsaufenthalt an der Universität von West Virginia in Morgantown (USA) bei Prof. Mark Koepkes Plasmaphysikgruppe. Mit der Gruppe von Prof. Koepke bestehen seit Anfang der 1990-er Jahre wissenschaftliche Beziehungen, und er weilte auch mehrmals als Gastprofessor bei der IEPPG. Außerdem stießen um diese Zeit Frau Sonja Tscholl, die sich mit dem Bau von beheizbaren Sonden beschäftigte, Robert Weis, der zusammen mit Dr. Carsten Winkler die Möglichkeiten einer ergiebigen Metastabilenquelle untersuchte, sowie Patrick Winkler, der die Q-Maschine mit einer neuen Heizquelle für die Heiße Platte versorgen sollte, zur IEPPG.

Auch die Auslandsbeziehungen der IEPPG intensivierten sich weiter, als ich einige sommerliche Forschungsaufenthalte an der Universität von Tromsø in Norwegen und der Königlichen Technischen Hochschule in Stockholm absolvierte. In der Tromsøer DP-Maschine untersuchten wir unter anderem die Entstehung einer Plasmadoppelschicht durch einen Ionenstrahl und im sogenannten Grünen Tank in Stockholm eine Strahlplasmaentladung.

Eine weitere wichtige und äußerst fruchtbare Auslandsbeziehung nahm im Jahre 1991 mit der Plasmaphysikgruppe am Jožef-Stefan-Institut in Ljubljana (Slowenien) ihren Anfang, deren Leiter Prof. Milan Cerček ist. Im Rahmen dieser intensiven wissenschaftlichen Beziehungen führte zunächst der heutige Professor an der Universität von Ljubljana, Tomaz Gyergyek, an der Innsbrucker DP-Maschine Forschungsarbeiten zu seiner Dissertation durch. Später wurde Prof. Milan Čerček regelmäßiger und jedes Mal herzlich willkommener Gastprofessor bei uns. Auch im Rahmen des im folgenden erwähnten EURATOM-Abkommens wurde diese Zusammenarbeit intensiv weitergeführt.

Die Zeit von 1996 bis heute: EURATOM-Assoziation und weiterer Aufschwung

Eine in ihrer Tragweite damals noch gar nicht abschätzbare Entwicklung begann Ende 1996, als Österreich dem EURATOM-Vertrag beitrug und dadurch die Möglichkeit erhielt, an der europäischen Fusionsforschung mitzuwirken. Auch wir stellten Überlegungen an, wie wir zur Lösung von offenen Fragen der Fusionsforschung beitragen konnten, hatten wir uns doch bisher nur mit kalten Plasmen beschäftigt. Wir entwickelten die Idee, unsere Kenntnisse über

Plasmasonden in den Dienst dieser Sache zu stellen. Zwar wurden in einigen der damals existierenden Fusionsexperimenten, insbesondere an sogenannten Tokamaks, bereits kalte Plasmasonden verwendet, jedoch haben diese unter anderem den Nachteil, dass sie einen der wichtigsten Plasmaparameter, nämlich das Plasmapotential und das daraus ableitbare elektrische Feld nur indirekt und mit einem systematischen Fehler behaftet messen können. Wir verwendeten jedoch schon seit vielen Jahrzehnten elektronenemissive Sonden, die eine direkte Anzeige des Plasmapotentials erlauben. Wir schlugen daher vor, im Rahmen unseres Teilprojekts der EURATOM Assoziation mit der Österreichischen Akademie der Wissenschaften an einigen kleineren Tokamaks emissive Plasmasonden einzusetzen. So entwickelte sich über Prof. Carlos Varandas eine sehr intensive und fruchtbare Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Kernfusion am Instituto Superior Técnico (IST) in Lissabon. Ebenso geschah es über Prof. Jan Stöckel mit dem Institut für Plasmaphysik der tschechischen Akademie der Wissenschaften in Prag (IPP.CR) und mit Dr. Carlos Hidalgo vom Umwelt- und Energieforschungsinstitut CIEMAT in Madrid. Im IST wird das ISTTOK-Experiment betrieben (Instituto Superior Técnico TOKamak) und am IPP.CR der CASTOR (Czech Academy of Science TORus). In beiden Fällen handelt es sich um kleinere Tokamaks. In Madrid wird das sogenannte TJ-II-Experiment betrieben, ebenfalls ein toroidales Fusionsexperiment, das jedoch nach einem anderen Prinzip arbeitet als ein Tokamak.

Der experimentelle Nachweis, dass emissive Sonden in kleineren Tokamaks eingesetzt werden können, gelang uns im Mai 1999 am ISTTOK in Lissabon. Umfangreiche Untersuchungen fanden dann ab Herbst des Jahres 2000 am CASTOR in Prag statt. Sehr bald stellte sich heraus, dass Anordnungen von mehreren emissiven Sonden zusammen mit kalten Sonden geeignet sind, die elektrischen Feldfluktuationen in der Randschicht von Tokamakplasmen genauer als bisher zu bestimmen, was es, zusammen mit den gleichzeitig bestimmten Fluktuationen der Plasmadichte, erlaubt, den radialen turbulenten Teilchenverlust aus dem Tokamakplasma direkt zu bestimmen. Diese Untersuchungen an den beiden og. Instituten führten zu zahlreichen Veröffentlichungen, deren vorläufig letzte im Winter 2008 von der Fachzeitschrift "Plasma Physics and Controlled Fusion" sogar als Sonderartikel ("featured article") hervorgehoben wurde.

In dieser Zeit kam es in Form eines im Jahre 2000 erstmals genehmigten CEEPUS-Netzwerkes (Central European Exchange Programme for University Studies) auch zu einer Verstärkung der wissenschaftlichen Beziehungen mit osteuropäischen Universitäten. An diesem Netzwerk sind neben der Universität von Innsbruck die Universitäten von Sofia (Bulgarien), Constanta und Iași (Rumänien), Bratislava (Slowakei), Ljubljana (Slowenien), Prag und Brno (Tschechien) sowie seit kurzem auch die Universitäten von Podgorica (Montenegro) und von Novi Sad (Serbien) beteiligt. Von allen diesen Universitäten kamen nun ForscherInnen und StudentInnen nach Innsbruck, und ebenso ergab sich natürlich auch ein reger Austausch zwi-

schen den anderen Partneruniversitäten untereinander. Weitere Austauschprogramme bestehen im Rahmen des Erasmusabkommens mit der Universität von Tromsø und der Alexandru-Ioan-Cuza-Universität in Iași. Bilaterale Zusammenarbeiten bestehen mit der Polytechnischen Universität von Madrid, der Universität von Ljubljana und der Karls-Universität in Prag.

Hier ist wiederum besonders die Alexandru-Ioan-Cuza-Universität in Iași (Rumänien) hervorzuheben, denn meine persönliche Geschichte hatte einmal mehr einen starken Einfluss auf die des Innsbrucker Plasmalabors. Im Herbst des Jahres 1997 kam zum ersten Mal eine Forscherin nach Innsbruck, die seit 1999 dauerndes Mitglied unserer Gruppe ist. Seit dem Jahre 2000 sind wir verheiratet, und Frau Dr. Codrina Ioniță-Schrittwieser hat wesentlich zum Aufschwung und Erfolg der IEPPG beigetragen, denn nach dem Vorbild anderer Forscherehepaare ergab sich aus dieser Konstellation eine ununterbrochene gegenseitige Anregung und Zusammenarbeit von ungeahnter Intensität. Ein weiterer Forscher kam aus Iași nach Innsbruck und blieb hier: Dr. Petru Balan war von 1998 bis 2007 mit einer kurzen Unterbrechung in den Jahren 1999/2000 zunächst als mein Dissertant und seit 2004 als Post-doc fleißiges Mitglied der IEPPG. Zahlreiche DiplomandInnen, DissertantInnen, AssistentInnen und ProfessorInnen verbrachten seit dem Jahre 2000 längere Forschungsaufenthalte bei der IEPPG wie zum Beispiel Valentin Pohoță, Valerian Ignatescu, Iulian Teliban, Cezar Gaman, George Amarandei, Radu Apetrei und Bogdan Olenici sowie Frau Oana Niculescu aus Iași, die alle intensiv zu den wissenschaftlichen Ergebnissen der IEPPG beitrugen. Selbstverständlich zählte auch weiterhin Prof. Gheorghe Popa, der nach der Revolution in Rumänien Ende 1989 in den 1990-er Jahren acht Jahre lang Rektor der Alexandru-Ioan-Cuza-Universität in Iași war und nun seit einigen Jahren Vizerektor für Forschung ist, zu den regelmäßigen herzlich willkommenen Gästen bei der IEPPG. Im Jahre 1989 erhielt ich zusammen mit Dr. Erhard Mravlag, Prof. Kasoyuki Ohe, Prof. Nicoleta Dumitrașcu und Prof. Gheorghe Popa den Constantin-Miculescu-Preis der Rumänischen Akademie der Wissenschaften. Für unsere Verdienste um die Zusammenarbeit der beiden Universitäten wurden Prof. Siegbert Kuhn und ich im Jahre 2003 zu Honorarprofessoren der Alexandru-Ioan-Cuza-Universität ernannt.

In Zusammenarbeit mit Prof. Mircea Sanduloviciu und Prof. Dan Dimitriu von der Universität begann sich die IEPPG in der Innsbrucker DP-Maschine nun auch mit lokalisierten Entladungsphänomenen, den sogenannten Feuerbällen, zu beschäftigen. Diese können durch kleine zusätzliche Anoden in einem dünnen Plasma angeregt werden. Neben der komplexen plasmaphysikalischen Dynamik dieser Erscheinungen, die bisher theoretisch nur ansatzweise erfasst ist, haben Feuerbälle auch einen ausgesprochenen ästhetischen Reiz und unter Umständen technische Anwendungsmöglichkeiten. Abb. 3.3.2.3 zeigt einige Beispiele von Feuerbällen. Diese Bilder stammen von einer Experimentreihe, die während der Gastprofessur von Prof. Reiner Stenzel von der Universität von Kalifornien in Los Angeles im Oktober 2007 an der Innsbrucker DP-Maschine durchgeführt wurde.

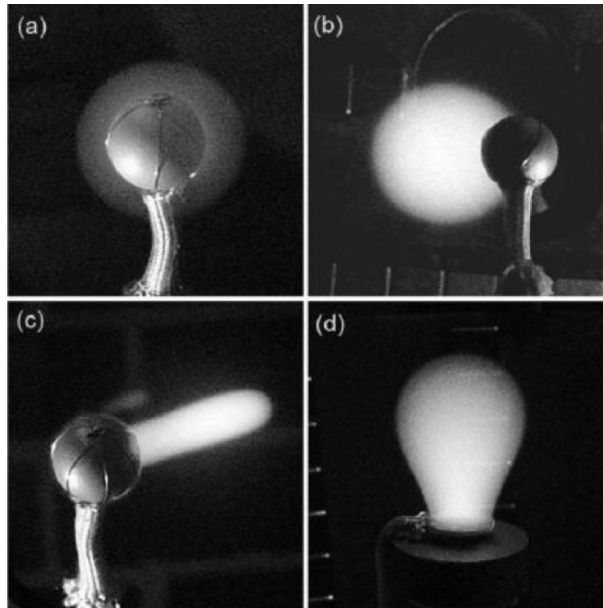


Abb. 3.3.2.3: Verschiedene Feuerbälle in der Innsbrucker DP-Maschine, angeregt durch eine positiv vorgespannte Messingkugel von 10mm Durchmesser.

Zusätzlich zu den beiden Innsbrucker Experimenten (Abb. 3.3.2.1 und 3.3.2.2) wurde für technische Anwendungen in den Jahren 2002 – 2003 eine sogenannte Hohlkathode aufgebaut, die auf Grund der speziellen Geometrie als Sputterquelle geeignet ist. D.h., auf Grund der hohen Entladungsspannung werden mit hohem Wirkungsgrad von den Plasmaionen Atome des Kathodenmaterials abgetragen (abgesputtert), die sich auf einem geeigneten Substrat niederschlagen. Dadurch können besonders aus ferromagnetischen Substanzen dünne Schichten erzeugt werden, was mit anderen Methoden problematisch ist. Dieses Experiment wird in enger Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. Dimitru Luca der Universität in Iași betrieben, wobei sich besonders Gaststudenten aus Iași intensiv mit unserer Hohlkathode beschäftigten. Außerdem arbeitete Frau Ivana Vojvodic von der Universität von Montenegro in Podgorica intensiv mit diesem Experiment und konnte so ihre Diplomarbeit abschließen. Abb. 3.3.2.4 zeigt links eine typische Hohlkathodenentladung und rechts eine damit erzeugte Ti-Schicht, die im Innsbrucker STM (scanning tunnel microscope) der Arbeitsgruppe des Vizerektor Prof. Tilmann Märk und Prof. Paul Scheier aufgenommen wurde, so dass sich so auch eine Zusammenarbeit innerhalb des Institutes für Ionenphysik und Angewandte Physik ergab.

Auf dem Gebiet der Fusionsforschung kam es zu einer weiteren Intensivierung, als in den Jahren 2004 bzw. 2005 Zusammenarbeiten mit den beiden Teilinstituten des Max-Planck-In-

stituts für Plasmaphysik (IPP) in Greifswald bzw. Garching bei München begannen. Zusammen mit dem IPP in Greifswald begann in Zusammenarbeit mit der VINETA-Gruppe von Prof. Thomas Klinger die Entwicklung einer lasergeheizten emissiven Sonde, die gegenüber den bisher im ISTTOK und CASTOR verwendeten konventionellen emissiven Drahtsonden große Vorteile bietet, allerdings auch komplizierter in der Anwendung ist. Mit Hilfe eines kleinen Stiftes aus Lanthanhexaborid ist es bei 50 W Laserleistung möglich Emissionsströme von mehreren Ampere zu erzeugen, was eine derartige Sonde auch für die Randschicht heißerer Fusionsexperimente geeignet erscheinen lässt.

Am großen ASDEX-Upgrade-Tokamak (Axisymmetric Divertor Experiment) am IPP in Garching wurden verschiedene Sondenanordnungen verwendet, die ähnlich wie am ISTTOK und am CASTOR, eine direkte Messung des radialen turbulenten Teilchenflusses in der Randschicht des Tokamakplasmas ermöglichten. Wegen der wesentlich höheren Plasmadichte und -temperatur und der viel längeren Entladungsdauer können am ASDEX Upgrade jedoch (noch) keine emissiven Plasmasonden verwendet werden, sondern kalte Sonden, die mit Hilfe eines pneumatisch betriebenen Sondenantriebs jeweils nur für ca. 0,1 sec in die Randschicht eingeschoben werden. Die neueste Sondenvorrichtung, die erstmals im Februar 2008 zur Anwendung kam, beruht gänzlich auf der Planung der IEPPG und enthält zusätzlich eine kleine Spulenanordnung, mit deren Hilfe auch magnetische Fluktuationen in allen drei Raumrichtungen gemessen werden können. Das komplizierte Sondengehäuse wurde vom Gaststudenten Cătălin Lupu von der Alexandru-Ioan-Cuza-Universität in Iași entworfen. Die Spule wurde von der Gruppe am RFX (Reversed Field eXperiment) in Padua entwickelt, so dass sich damit auch eine Zusammenarbeit mit der italienischen EURATOM-Assoziation ergab.

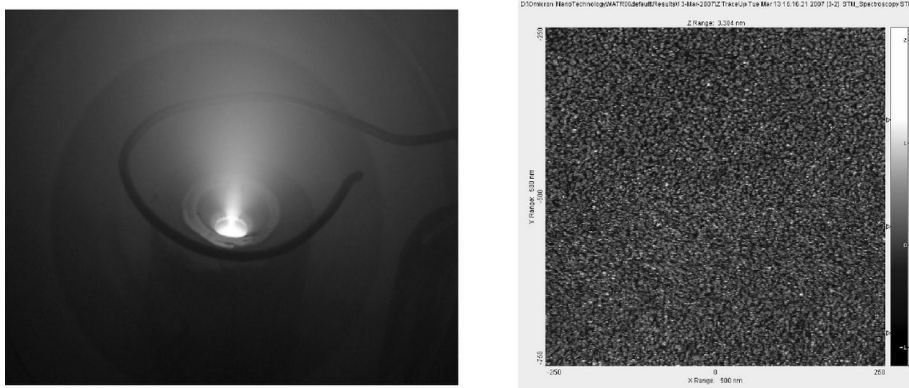


Abb. 3.3.2.4: Hohlkathodenentladung (links) und damit erzeugte Ti-Schicht (rechts); der Ausschnitt hat eine Größe von 500 x 500 nm.

Mit Hilfe dieser Sonden konnten interessante neue Aufschlüsse über den Mechanismus des turbulenten Teilchenflusses in einem Tokamakplasma gewonnen werden, insbesondere über die sogenannten ELMs (= Edge Localized Modes). Dies sind intensive Transportereignisse, die jeweils nur einige ms dauern und sich im Rhythmus von einigen 10 ms wiederholen. Obwohl die moderne Tokamakforschung besonders mit der sogenannten H-Mode (= High confinement mode) große Fortschritte auf dem Gebiet des magnetischen Einschlusses eines heißen Fusionsplasmas erzielt hat, sind bei ELMs immer noch viele wichtige Fragen offen, zumal ELMs für die sogenannten Divertoren des künftigen internationalen Fusionsexperiment ITER, dessen Bau in Cadarache bei Aix-en-Provence (Frankreich) begonnen hat, sehr gefährlich werden können. Abb. 3.3.2.5 zeigt ein schematisches Bild der Sondenanordnung, die nun im ASDEX Upgrade verwendet wird.

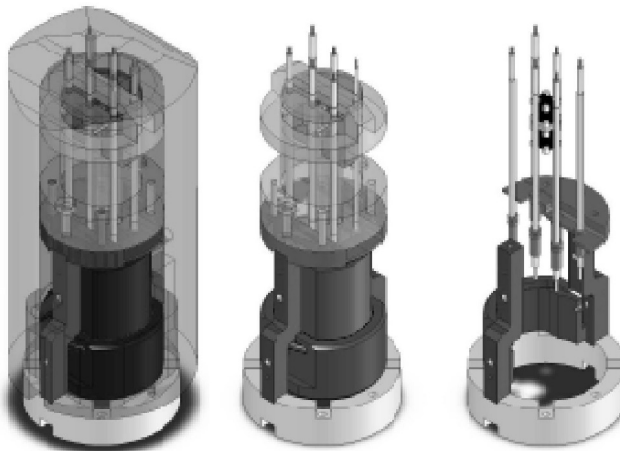


Abb. 3.3.2.5: Sondenanordnung zur Messung in ASDEX Upgrade am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München mit sechs kalten Sonden und einer Tripelspule für magnetische Fluktuationen.

Die Innsbrucker Experimentelle Arbeitsgruppe besteht derzeit aus dem Verfasser dieses Berichtes, Dr. Codrina Ioniță-Schritt Wieser, dem Dissertanten Dipl.-Ing. Christian Maszl sowie den DiplomandInnen Ramona Gstrein, Franz Mehlmann, Ronald Stärz und Patrick Winkler. Die Forschung wird außer von der Universität Innsbruck auch über Forschungsprojekte des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung und das Teilprojekt P5 der Assoziation EURATOM-ÖAW finanziert. Die weitere Forschung der IEPPG wird sich verstärkt mit der Untersuchung von Randschichtturbulenz in größeren Fusionsexperimenten wie z.B. auch den JET (= Joint European Torus) in Culham bei Oxford mit Hilfe der von uns entwickelten Sonden, sowie mit technischen Anwendungen von kalten Plasmen beschäftigen.

Außerdem wird nach wie vor auch die Entwicklung und weitere Erforschung von Plasmasonden und deren komplizierter Theorie ein wichtiges Forschungsthema sein.

Ich möchte diese Gelegenheit auch benützen, um allen zu danken, die mich während meiner Karriere unterstützt haben. Dabei ist natürlich zuvorderst Prof. Ferdinand Cap zu nennen, der mir im Jahre 1973 die Möglichkeit gegeben hat, mich mit Plasmaphysik zu beschäftigen und damit auch so etwas wie einen Jugendtraum zu verwirklichen. Und trotz einiger großer Hindernisse konnte ich doch meinen Weg konsequent weitergehen. Zu größtem Dank bin ich auch den Professoren Franz Howorka, Werner Lindinger und Tilmann Märk verpflichtet, die mich nach meiner Habilitation im Jahre 1990 mit offenen Armen in ihrem Institut aufnahmen, womit, wie früher erwähnt, auch das Innsbrucker Plasmalabor eine sichere Heimstätte fand. Leider weilen ja die Prof. Howorka und Lindinger nicht mehr unter uns; Prof. Howorka starb Ende des Jahres 1990 nachdem ihn ein Autofahrer beim Überqueren einer Straße nieder gestoßen hatte, und Prof. Lindinger erlitt im Jahre 2001 einen Unfall beim Baden in Hawaii.

Auch den Professoren Siegbert Kuhn und Klaus Schöpf danke ich nicht nur für die langjährige wissenschaftliche Zusammenarbeit sondern auch für ihre Freundschaft in guten wie in schlechten Zeiten. Ebenso danke ich den Sekretärinnen der Institute für Theoretische Physik und für Ionenphysik und Angewandte Physik und allen anderen Mitgliedern und Gästen, denen ich im Laufe der vielen Jahre begegnen und die ich teilweise auch näher kennen lernen durfte, möchte ich meinen herzlichsten Dank aussprechen.



Abb. 3.3.2.6: Experimentelle Plasmagruppe um Roman Schrittwieser (Juni 2006).

3.3.3 Komplexe Systeme

Priv.-Doz. Dr. Alexander Kendl

Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, Universität Innsbruck

Die AG „Komplexe Systeme“ war, meiner Habilitation im Juni 2007 folgend, zunächst als dritte eigenständige Forschungsgruppe zur Plasma- und Energiephysik am Institut für Theoretische Physik ins Leben gerufen worden. Nach Annahme einer Kat.1 Stelle am Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik im April 2008 ist die Gruppe nun dort angesiedelt und besteht neben ihrem Leiter aus dem Doktoranden Stefan Konzett, den Diplomanden Felix Gennrich und Josef Peer, sowie der Projektassistentin Irene Milewski. Mehrere EU- und FWF-Projekte sind in Beantragung, um einen weiteren Ausbau der Gruppe zu fördern.



Wir beschäftigen uns in erster Linie mit komplexen nichtlinearen dynamischen Systemen, deren numerischer Simulation auf Hochleistungs- und Extremrechnern, sowie mit Datenanalyse und Visualisierung. Unser Hauptinteresse besteht derzeit an einem grundlegenden Verständnis von Turbulenz und Strukturbildung in magnetisierten Plasmen sowie deren konkreter Modellierung mit Bezug zu Fusionsexperimenten. Daneben werden allgemeine Fragestellungen verfolgt, wie etwa nichtlineare Dynamik in zweidimensionalen Systemen (besonders Zonenströmungen), die Weiterentwicklung numerischer Verfahren zur Computational Physics (z. B. Lattice-Boltzmann Methode) oder spezielle Aspekte der Biophysik (Wechselwirkung elektromagnetischer Impulse durch Blitzentladungen mit dem Sehnervensystem). Eine weitere Aufgabe der Gruppe ist die theoretische und numerische Unterstützung der Experimente zur fusionsrelevanten Plasma-Wand-Wechselwirkung sowie anderer aktueller Fragestellungen der Arbeitsgruppe Nano-Bio-Physik von Univ.-Prof. Dr. Tilmann Märk und Univ.-Prof. Dr. Paul Scheier.

Die 50-jährige Geschichte der Plasmaphysik in Innsbruck konnte ich selbst erst in den letzten fünf Jahren mit verfolgen und gestalten, nachdem ich Ende 2003 auf Vermittlung durch Hon.-Prof. Dr. Karl Lackner von einer Postdoc-Stelle am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching kommandiert mit einem individuellen Euratom Training Marie-Curie Fellowship am Institut für Theoretische Physik der Universität Innsbruck betraut wurde. Zuvor war ich, nach dem Studium der Physik an der Universität Augsburg und der TU München mit Diplomarbeit am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, bereits mehr als sechs Jahre als Doktorand und Postdoc in Plasmaphysik und Fusionsforschung aktiv. Am IPP sowie während Aufenthalten an der Australian National University in Canberra und am Risø National Laboratory in Dänemark habe ich mich mit unterschiedlichen Aspekten von Instabilitäten, Wellen und Turbulenz in Tokamaks und Stellaratoren beschäftigt.

Das Marie-Curie Stipendium ermöglichte mir schließlich die Habilitation in Theoretischer Physik an der Universität Innsbruck über „Plasmaturbulenz in komplexen Magnetfeldstrukturen“ [Kendl, Innsbruck University Press, 2007]. Von Anfang 2007 bis Mitte 2008 war ich als Referent der interfakultären Forschungsplattform „Computer Science & Applied Computing“ der Universität Innsbruck tätig, in deren Verantwortung Koordination und Management von interdisziplinären Forschungsaktivitäten der Universität Innsbruck auf den Gebieten IT, E-Science und High-Performance Computing (HPC) liegen. Unter Leitung von Univ.-Prof. Dr. Sabine Schindler war es uns in dieser Zeit unter anderem möglich, im Rahmen des Infrastrukturprogramms IV des BMWF erfolgreich Mittel von 650'000 Euro für eine Erneuerung des HPC-Clusters der Universität einzuwerben, sowie die Universität zu überzeugen, zwei neue HPC-Fachstellen am Zentralen Informatikdienst einzurichten. Die so erzielte aktuelle HPC-Grundausstattung ist eine nötige und wesentliche Voraussetzung für alle rechnerbasierten Forschungsaktivitäten an der Universität [Kendl und Schindler, innsbruck university press, 2008], und ermöglicht uns eben insbesondere jetzt auch erst eine weiterhin international wettbewerbsfähige Forschung im Bereich der numerischen Plasmaphysik in Innsbruck. Der Zugang zu einem damit gesicherten lokalen HPC-Basissystem als wichtigem Arbeitspferd der AG „Komplexe Systeme“ wird aktuell ergänzt durch einen DEISA Extreme Computing Award, welcher dem internationalen Projekt „GEM“ (Bruce D. Scott, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Deutschland; Tiago Ribeiro, Centro de Fusao Nuclear, Portugal; Alexander Kendl, Universität Innsbruck, Österreich) einen Zugang zu extremen Rechenleistungen im europäischen Grid-Verbund DEISA von Höchstleistungsrechenzentren ermöglicht. Damit wollen wir unter anderem erstmals mit gyrokinetischen und gyrofluiden Modellen die den Betrieb eines Fusionsexperiments stark limitierenden ELM-Instabilitäten quantitativ simulieren und ergründen.

Eine wichtige Grundfinanzierung erhält die AG „Komplexe Systeme“ durch das Fusionsforschungsprojekt „Computational Plasma Dynamics“ (unter Leitung von A. Kendl) der Assoziation Euratom-ÖAW, über das wir in diverse koordinierte europäische Aktivitäten mit Bezug zu ITER eingebunden sind. In diesem Rahmen tragen wir insbesondere zur EU-Task Force „Integrated Tokamak Modelling“ bei (vgl. Falchetto et al., 2008). Unter den derzeit beantragten weiteren Projekten, welche sich schwerpunktmäßig wiederum mit der numerischen Simulation von Fusionsplasmen befassen, ist besonders eine Kooperation mit dem Institut für Astro- und Teilchenphysik erwähnenswert. Zusammen mit der Arbeitsgruppe zu Galaxiencluster von Univ.-Prof. Dr. Sabine Schindler planen wir die Anwendung gyrokinetischer Methoden aus der Fusionsforschung auf die offene Frage, welche turbulenten Mechanismen der beobachteten Dissipation von Bewegungsenergie kosmologischer Clusterdynamik in thermische Energie zugrunde liegen. Die Kombination aus weit entwickelten Simulationsmodellen (als „Spin-off“ unserer Fusionsforschung) mit der aktuellen Innsbrucker Hochleistungsrechner-Infrastruktur und mit nun bestmöglichen astronomischen Beobachtungen durch den gerade erfolgten österreichischen Beitritt zur ESO ergibt hier also unerwartete hochinteressante Synergien.

4

Wissenschaft im Kontext



Eröffnungsgäste: Dr. Ruggero Giannella, EC Scientific Officer (links); Univ.-Prof. Dr. Hannspeter Winter, Assoziation Euratom-ÖAW (rechts); unten von links: Dr. Oswald Mayr (ehem. Präsident der Industriellenvereinigung Tirol); Altrector Univ.-Prof. Dr. Manfred Gantner; MR Dr. Daniel Weselka; BM Hilde Zach; Univ.-Prof. Dr. Tilmann Märk (VR Forschung). Fotos: Dr. S. Prock.



4.1 1958-2008: 50 Jahre Fusionsforschung für den Frieden

Hon.-Prof. Dr. Karl Lackner

Max-Planck Institut für Plasmaphysik, EURATOM-Assoziation,
D-85748 Garching

Die Idee, die Fusion zweier leichter Atomkerne - wie es in der Sonne geschieht - zur Energiegewinnung zu nutzen, tauchte schon in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts auf. Im Gegensatz zur Kernspaltung breitet sich Kernfusion nicht wie eine Kettenreaktion, sondern wie ein Brenn- oder Detonationsprozess aus, sehr ähnlich einer chemischen Reaktion, nur mit Brenntemperaturen im Bereich von hundert Millionen – statt einiger hunderte – Grad, und einer pro Reaktion freigesetzten Energie im MeV, statt im eV-Bereich. Anders als bei der Kernspaltung erwies sich daher die kontrollierte Nutzung viel schwieriger als der Bau einer Bombe. Das Versprechen praktisch unbegrenzter Brennstoffressourcen, und die Abwesenheit radioaktiver Reaktionsprodukte stellten jedoch eine noch immer gültige, ausreichende Motivation dar, diese Herausforderung anzunehmen.

Zwei grundlegende Konzepte zur möglichen friedlichen Nutzung dieser Reaktion kristallisierten sich bald heraus: die Miniaturisierung der „Wasserstoffbombe“ zu einem kleinen Kügelchen, das durch Kompression zu einer Miniexplosion gebracht wird, und der stationäre Einschluss eines heißen Plasmas durch passend geformte Magnetfelder. Aus der ersten Idee entwickelte sich das Konzept der Trägheitsfusion, bei der geballte Laser- oder Teilchenstrahlenergie zur Verdichtung und zum Aufheizen eines Deuterium-Tritium Pellets benutzt wird; die zweite Linie führte zur Entwicklung der toroidalen magnetischen Einschlusskonfigurationen, als deren vorläufige Krönung das in Cadarache am Beginn des Aufbaus stehende ITER-Projekt zu sehen ist. Wie in der ganzen Welt konzentrierte sich die Forschung zur zivilen Nutzung der Kernverschmelzung auch in Innsbruck überwiegend auf den magnetischen Einschluss.

Ein Magnetfeld hemmt zunächst nur die Beweglichkeit von Teilchen senkrecht zu seinen Feldlinien. Will man damit den Druck eines heißen Plasmas kompensieren und die Energieverluste durch Wärmeleitung um die nötigen mehr als zehn Größenordnungen reduzieren, muss man die Magnetfeldlinien entweder auf geschlossene Flächen zwingen, oder den so genannten Spiegel-Effekt nutzen, der bewirkt, dass die Bewegung von Teilchen entlang Feldlinien in Richtung zunehmender Feldstärke gehemmt wird. Das Plasma muss auch zunächst

durch äußere Heizung auf eine entsprechende Brenntemperatur gebracht werden, da erst bei ca. 100 Millionen Grad die Selbstheizung durch energetisches Reaktionsprodukt die Aufrechterhaltung der Temperatur übernehmen kann. Sehr bald zeigte sich auch, dass der magnetische Einschluss ernsthaft mit dem Problem der Plasmaverunreinigungen zu kämpfen hat. Die Leistungsdichte in einem Fusionsreaktor ist nämlich gering – ca. 1/100 von der in einem Automotor oder einem Spaltreaktor – und selbst geringe Anteile nicht voll-ionisierter Atome führen zu elektromagnetischen Strahlungsverlusten, die ein schnelles Erlöschen der Entladung bedeuten könnten. Da die Plasmateilchen mehr als 10 keV, und die bei der Reaktion entstehenden Helium-Ionen (α -Teilchen) sogar 3.5 MeV Energie besitzen, besteht die Gefahr der Zerstäubung an Oberflächen und des Eindringens von Wandmaterial in das Plasma.

Das Studium der Kernfusion zur Energiegewinnung begann in den 50er Jahren vor allem in den USA, Russland und Großbritannien, und wurde bis 1958 weitgehend geheim betrieben. Bei der Genfer Konferenz zur friedlichen Nutzung der Kernenergie legten die Teilnehmer aus diesen Staaten jedoch ihre Ergebnisse offen, und auch Deutschland, Italien und Frankreich berichteten über theoretische und experimentelle Untersuchungen. Es gab eine Reihe von Konfigurationen, die im Prinzip Plasmaeinschluss versprachen, doch zeigten sich erst langsam Schritt auf Schritt die grundlegenden Schwierigkeiten. In sich geschlossene Feldlinien müssen topologisch ineinander verschachtelte Tori bilden, aber Konsequenzen der Abweichungen von der Idealform werden erst bei ausreichend hohen Temperaturen sichtbar. Magnetische Spiegelfelder bremsen nicht jene Teilchen die sich fast parallel zu Feldlinien bewegen. Das einfache Bild, nach dem Teilchen sehr eng (innerhalb eines Gyrationkreises) an eine bestimmte Feldlinie gebunden sind, stimmt nur in homogenen Feldern: Inhomogenitäten, wie sie in toroidaler Geometrie unvermeidbar sind, führen zu teilweise sehr komplexen Driftbahnen. Erst die leistungsfähigen Großrechner der 80er Jahre erlaubten es, Feldkonfigurationen zu bestimmen, in denen Teilchen in einem endlichen Gebiet eingeschlossen blieben. Relativ einfach zu analysieren waren nur die strikt axisymmetrischen Konfigurationen, die wir heute unter den Namen Tokamak und toroidale Pinche kennen. Die aber wahrscheinlich traumatischste Erfahrung war die Erkenntnis, dass nur wenige der möglichen Gleichgewichtskonfigurationen auch stabil sind.

Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser frühen Forschungsperiode war die Formulierung des Energieprinzips für die magnetohydrodynamische Stabilität 1958, das allerdings seinen vollen Nutzen erst durch die Entwicklung numerischer Methoden und die Verfügbarkeit ausreichend leistungsfähiger Rechner in den 70er Jahren zeigte. Selbst dieses Energieprinzip macht jedoch die Annahme, dass Magnetfelder in das Plasma eingefroren sind. Langsamere Instabilitäten, bei denen diese Annahme nicht mehr gerechtfertigt ist, können selbst dann noch auftreten, wenn dieses Kriterium erfüllt ist. Die Zeit bis zur Genfer Konferenz und das Jahrzehnt danach waren daher geprägt von eher bitteren experimentellen Erfahrungen. Einfache lineare

Konfigurationen, bei denen das Plasma notwendigerweise an den Enden in Kontakt mit materiellen Wänden ist, zeigten zwar ein theoretisch einigermaßen verständliches Verhalten, waren jedoch als Modell eines Fusionsreaktors eine Totgeburt, da sie mehrere Kilometer lange sein müssten, um die Endverluste in Grenzen zu halten. Versuchte man die Enden in der Form magnetischer Spiegel zu verschließen, blieben die Verluste trotzdem groß, und es begannen Instabilitäten aufzutreten.

Es lag daher nahe, die linearen Plasmasäulen, die, nach der Richtung des Magnetfeldes Theta-, Z- oder „Screw“-Pinch genannt wurden, zu einem Torus zu biegen. Dabei folgt schon aus einer einfachen Gleichgewichtsbedingung, dass ein reiner Theta-Pinch nicht möglich war, und ein reiner Z-Pinch war schon in gerader Anordnung instabil. Große Hoffnung setzte man in eine Mischung der beiden Feldkomponenten, die tatsächlich in einem frühen Großexperiment: „Zeta“ in Culham verwirklicht wurde. Es zeigte ein anfänglich virulent instabiles Verhalten, und wurde – teils zu Unrecht – als dramatischer Misserfolg gewertet. Erst später, als der neue Hoffnungsträger bereits der Tokamak war, begann man dieses Verhalten zu verstehen: zwar war die anfangs durch den Aufbau der Entladung aufgeprägte Magnetfeldform tatsächlich stark instabil, doch führte diese Instabilität dann in einer dynamischen Selbstorganisation zur Ausbildung einer neuen „Reversed field pinch“ genannten Konfiguration, die viel bessere Stabilitätseigenschaften hatte. Das schnelle, vernichtende Urteil über diese Anlage kam einfach von den zu hoch gestreckten Erwartungen.

Es gab einen weiteren Weg, topologisch toroidale Flussflächen zu produzieren, jedoch unter Aufgabe der Axisymmetrie – den von Lyman Spitzer erfundenen Stellarator. Eigentlich war auch dieses Konzept, in der damaligen Form, nicht echt lebensfähig. Die Aufgabe der Axisymmetrie ändert nämlich qualitativ die Natur der Driftbahnen der Teilchen, sodass sie nicht immer in einem endlichen Gebiet eingeschlossen bleiben, und zumindest teilweise verloren gehen. Dies wurde allerdings erst später völlig klar erkannt, und noch später wurde dann sogar ein Heilmittel gefunden. In den 60ern aber krankte der Stellarator daran, dass er sehr sensibel gegen Feldfehler war, und dass das entlang dieser Linie in Princeton gebaute Großexperiment - der C-Stellarator - ähnlich wie Zeta die gesetzten Erwartungen dramatisch verfehlte. Ein paar kleinere Stellaratorexperimente – vor allem in Garching – zeigten allerdings, auf die Größe bezogen, viel positivere Ergebnisse. Sie konnten zwar den augenblicklichen Trend nicht aufhalten, hielten aber das Feuer der Stellaratorforschung am Leben, bis sich mehr als ein Jahrzehnt später ein differenzierteres Verständnis dieser Ergebnisse durchsetzte.

So schien die Fusionsforschung gegen Ende der 60er Jahre einer Götterdämmerung zu zusteuern. Einige Einschlusskonzepte waren in sehr großen Anlagen realisiert worden und hatten die Erwartungen bitter enttäuscht. Die Geschichte der Fusion zeigt Analogien zu Darwins Theorie von der *Entstehung der Arten*, und Ende der 60er war der Zeitpunkt des Dinosau-

riersterbens. Es wäre auch das Ende der Fusionsforschung gewesen, wenn nicht in der damaligen Sowjetunion ein paar kleine Säugetiere kräftige Zeichen von Lebensfähigkeit gezeigt hätten. Sie hießen Tokamaks, und ihre weitere Genealogie ist in Abb. 4.1.1 illustriert. Ein Tokamak ist eigentlich – geometrisch – ein Verwandter von Zeta, nur stehen die toroidalen und poloidalen Feldkomponenten in einem anderen Größenverhältnis. Die toroidale Feldkomponente ist viel größer, und da das Konzept von vornherein in dem Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfelddruck (genannt β : eine ganz zentrale Kenngröße des magnetischen Einschlusses) auf wenige Prozent begrenzt ist, erschien auch dieses Konzept vor der Entwicklung leistungsfähiger Supraleiter als hoffnungslos. (Tatsächlich hatte der deutsche Fusionspionier Arnulf Schlüter dieses Einschlussprinzip auch unabhängig bereits beschrieben, aber wegen des zu geringen erreichbaren β -Wertes verworfen). Im Jahr 1968 berichteten Wissenschaftler aus der Sowjetunion in einer Konferenz in Nowosibirsk jedoch über sensationelle erreichte Temperaturwerte (im 10 Millionen Grad Bereich) und damit begann nicht nur die Erfolgsgeschichte des Tokamaks, sondern auch eine Tradition der engen Zusammenarbeit der Fusionsforscher über den eisernen Vorhang hinweg. Eine Gruppe Culhamer Wissenschaftler reiste mit einer Laserapparatur an das Kurchatov-Institut und verifizierte mit der damals neuen Methode der Thomson-Streuung die Temperaturschätzungen der sowjetischen Kollegen.

Abbildung 4.1.1 zeigt wie sich diese neue Spezies ausbreitete, wuchs, mutierte, und in der erfolgreichsten Mutationsform einmal ITER werden wird. Überall begann der Bau größerer Tokamaks, in den USA wurde zur Beschleunigung des Prozesses sogar schnell einmal der C-Stellarator umgebaut. Zwei Entwicklungen aber fielen aus diesem Schema des einfachen linearen Wachstums heraus. Wenn man die Aussagen der Stabilitätskriterien ernst nimmt, sollten Tori mit einer in vertikaler Richtung elongierten Querschnittsform (D-Form) höhere β -Werte erreichen können. Diese theoretische Aussage war bekannt, aber der Mut nach ihr zu handeln, war unterschiedlich verteilt. Die Sowjetunion, begrenzt in den finanziellen Mitteln, baute eine kleine Anlage (Fingerring: T9). In den USA wurde ebenfalls eine etwas größere, auf dieses Prinzip basierende Anlage (ISX-B) errichtet, während für das Flaggschiff der amerikanischen Forschung, TFTR ein konventioneller kreisförmiger Querschnitt vorgesehen blieb. Europa plante, neben mehreren kleineren Anlagen, ebenfalls ein Großexperiment, das wie TFTR einen Betrieb mit Tritium und daher signifikante thermonukleare Energieproduktion zulassen sollte. Hier vertraute man jedoch der Theorie und stützte die Pläne auf einen D-förmigen Plasmaquerschnitt.

Das zweite, qualitativ neue Element betraf den Divertor. Wie erwähnt stellen Verunreinigungen, die beim Kontakt der Wand mit dem heißen Plasma entstehen, eine Bedrohung für jedes Plasmaexperiment dar. Durch eine spezielle Magnetfeldform mit einer Separatrix kann man diesen Wand-Plasma Kontakt und die damit verbundene Verunreinigungsquelle jedoch in eine getrennte Kammer verschieben, und dies bot Hoffnung das Plasma sauber halten zu kön-








nen. Die Idee war bereits an einem Stellarator getestet worden, erwies sich dort aber als zu erfolgreich: nicht nur die Verunreinigungen, sondern das ganze Plasma verschwanden in Rekordzeit aus dem magnetischen Gefängnis. Da in einem Tokamak ein Divertor jedoch unter Beibehaltung der Axisymmetrie konstruiert werden kann, waren die Vorzeichen hier günstiger, und man entschloss sich in Europa und in den USA zum Bau von zwei mittelgroßen Anlagen, die ASDEX (axisymmetrisches Divertor Experiment) bzw. PDX (poloidal divertor experiment) genannt wurden.



Die amerikanischen Kollegen hatten gleich vier Divertoren an den Ecken eines kissenförmigen Plasmaquerschnitts vorgesehen, während ASDEX in Garching ein fast kreisförmiges Plasma mit ohrenförmigen Auswüchsen am unteren und oberen Ende produzieren sollte. Dieses Plasma war viel einfacher zu kontrollieren und so wurde an ihm die wahrscheinlich wichtigste Entdeckung der Tokamakforschung gemacht: die Existenz einer Bifurkation im Wärmetransport, die bei ausreichend hoher Heizleistung einen zweiten Zweig im Energieeinschlussverhalten – das so genannte H-Regime – zulässt. Die praktischen Konsequenzen dieser Entdeckung waren dramatisch, da sich – bei konstanter Heizung des Plasmas – dessen Energieinhalt plötzlich verdoppelte. Obwohl unmittelbar klar war, dass dieses Phänomen auf der Unterdrückung der Turbulenz in einer dünnen Schicht in der Nähe des Plasmarandes beruht, und es starke Hinweise gibt, dass dies durch die Wirkung einer verscherten Strömung im Plasma geschieht, gibt es bis heute kein ab-initio Modell zu seiner Erklärung. Seine praktische Bedeutung aber war sofort klar, und da das H-Regime in Divertortokamaks ein sehr robustes Phänomen ist, änderte seine Entdeckung grundlegend den weiteren Verlauf der Fusionsforschung. Alle ab diesem Zeitpunkt geplanten Tokamaks hatten einen Divertor, und existierende bzw. im Bau befindliche Anlagen (JT-60 in Japan, JET) wurden bei erster Gelegenheit auf diese Geometrie umgebaut. JET (wie das kleinere amerikanische Experiment Doublet III, später umgebaut zu DIII-D) hatte die besonderen Vorteile eines großen Plasmavolumens und eines flexiblen Magnetfeldes, die ihm bereits vor den entsprechenden Umbauten einen Separatrix-begrenzten Betrieb mit Zugang zum H-Regime erlaubten.

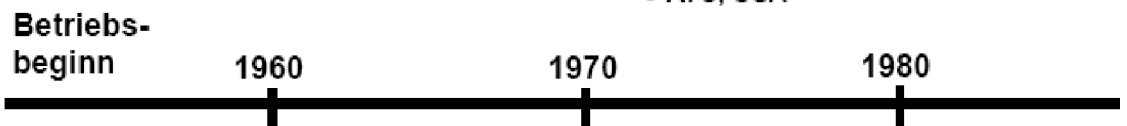
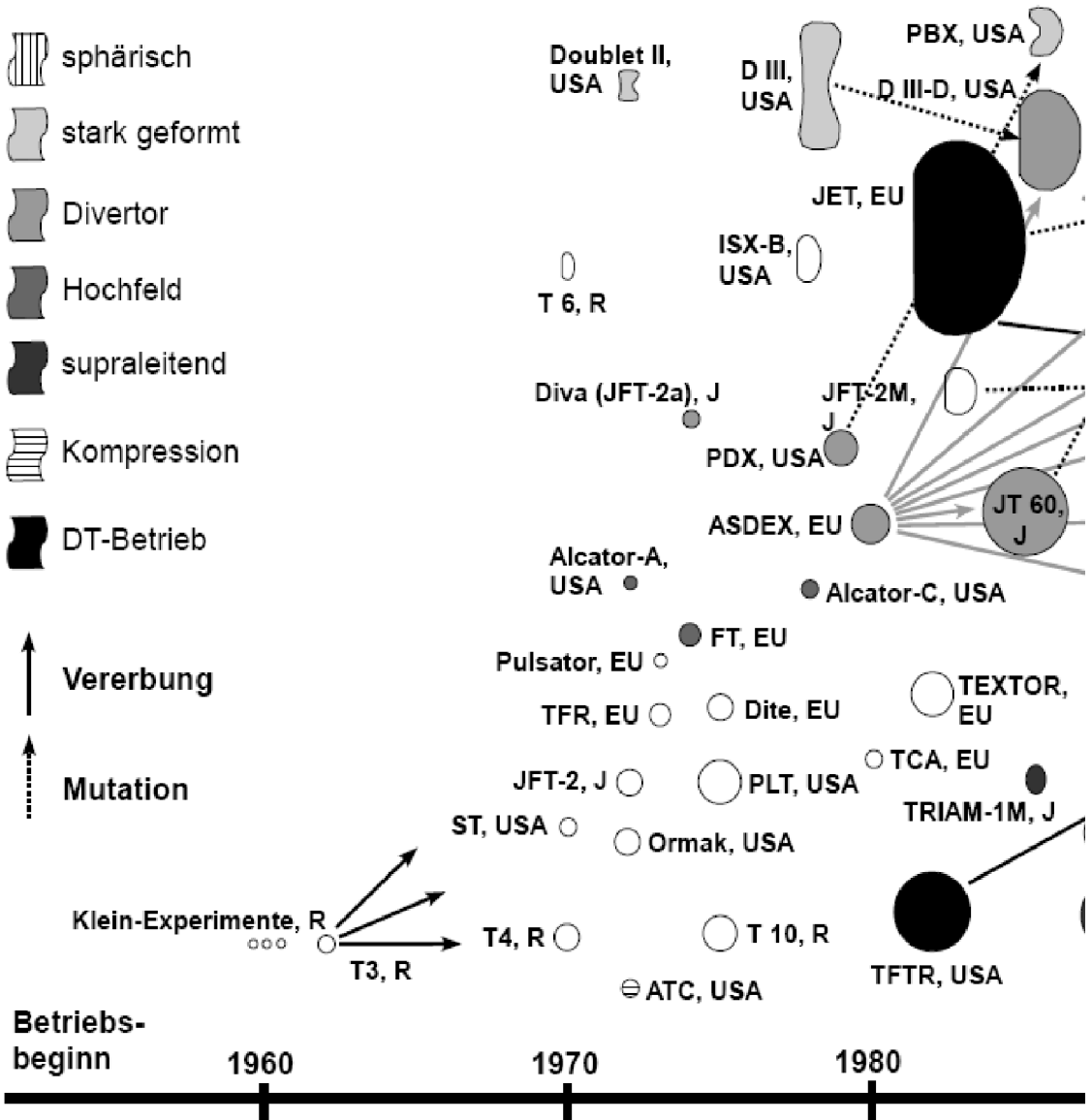
Abb. 4.1.1 (Doppelseite): Betriebsbeginn wichtiger Tokamakexperimente und ihre Beiträge zum Stammbaum von ITER. Querschnitt in ungefährem Maßstab der Größe; der Farbcode charakterisiert besondere Merkmale. Gestrichelte Linien: Umbauten zu einer neuen Anlage; durchgezogene Linie: Übernahme wichtiger Merkmale. (Abbildung in Farbe online: www.plasmaphysik.at)

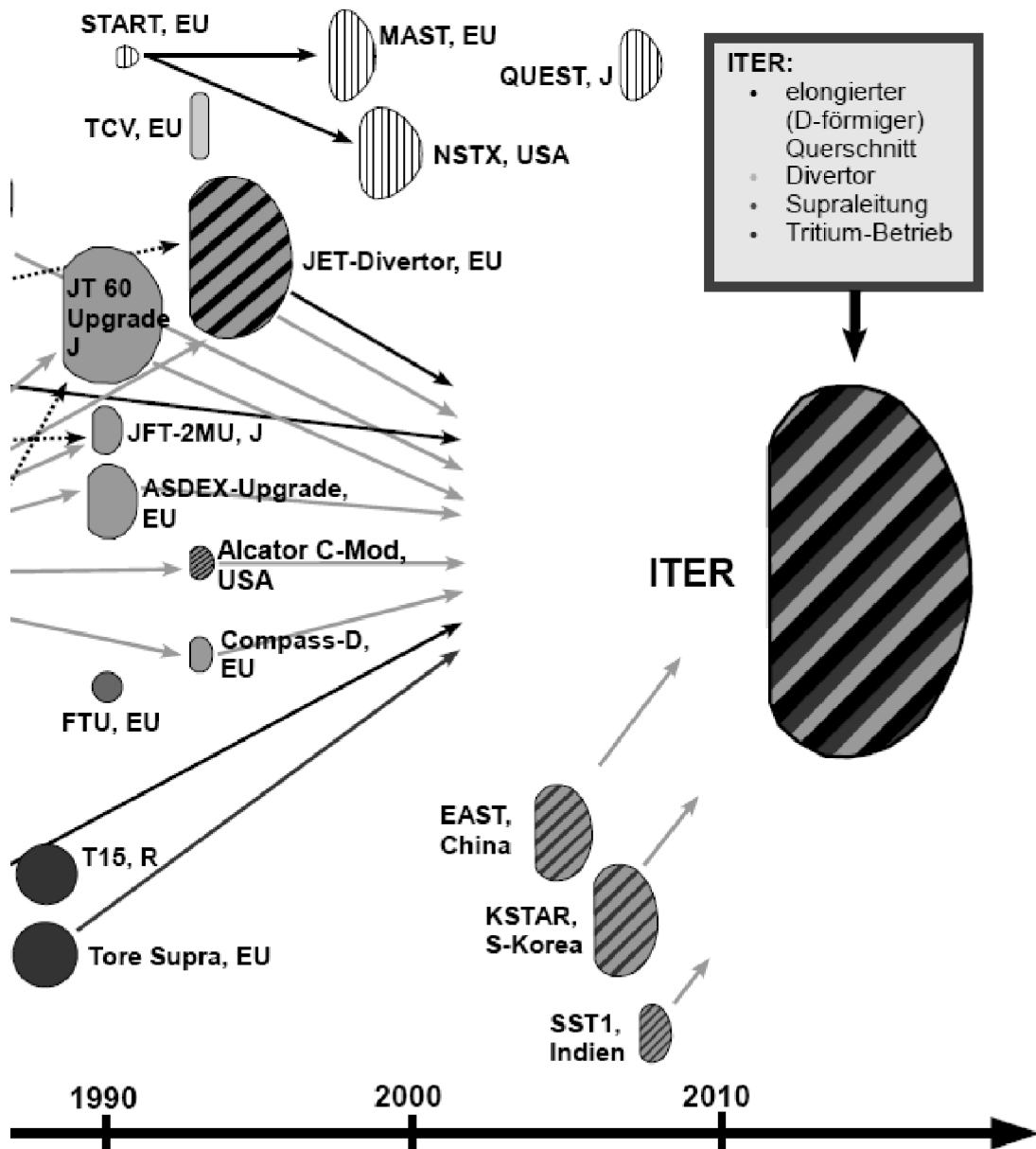
Tokamak Genealogie

Wichtige Tokamak-Experimente

-  sphärisch
-  stark geformt
-  Divertor
-  Hochfeld
-  supraleitend
-  Kompression
-  DT-Betrieb

-  Vererbung
-  Mutation





Besonders bedeutend war jedoch, dass alle diese qualitativen Verbesserungen des Tokamak-konzepts miteinander kombinierbar waren. Ein Divertortokamak konnte auch mit einem stark elongierten Plasmaquerschnitt betrieben werden, und bringt - neben dem unverhofften Zugang zum H-Regime - auch eine signifikante Reduktion der Verunreinigung des Plasmas. Um die für die Fusionsreaktionen nötigen Temperaturen von mehr als 10 keV (entsprechend > 100 Millionen °K) zu erreichen, musste man passende Heizmethoden entwickeln, und auch dies gelang sehr erfolgreich durch die Einstrahlung oder Anregung elektromagnetischer Wellen im Plasma in verschiedenen Frequenzbereichen (einige MHz bis zu mehr als 100 GHz) oder dem Einschuss hochenergetischer Neutralteilchen. Sogar ein Weg zur Bekämpfung des prinzipiellen Handicaps des Tokamaks wurde entwickelt: er benötigt nämlich zur Erzeugung geschlossener magnetischer Flussflächen einen toroidalen Plasmastrom, der nur für einen begrenzten Zeitraum durch Induktion über eine Transformatorspule getrieben werden kann. Ein derartiger Strom kann auch durch gezielten Impulsübertrag auf Elektronen oder Ionen getrieben werden, erfordert dann aber beträchtliche Leistung in Form elektromagnetischer Wellen oder Teilchenstrahlen. Andere Beiträge des Magnetfeldes werden durch äußere Spulen erzeugt. In einem Reaktor müssen diese supraleitend sein, um Widerstandsverluste (die bei normal leitenden Spulen leicht die Fusionsleistung übersteigen könnten) zu eliminieren. Auch diese Technologie wurde bereits in den 80er Jahren an Tokamaks erprobt: an einem kleinen japanischen Experiment und einem großen europäischen (Tore Supra, in Cadarache/Frankreich). Die Kombination aller dieser physikalischen und technologischen Fortschritte bot die Basis um einen Testreaktor konkret zu planen. Bereit anfangs der 80er Jahre war ein derartiges Unternehmen unter der Ägide der IAEA, mit dem Namen Intor, gestartet, aber eher in der Form einer Konzeptstudie, ohne konkrete Pläne zur Realisierung. Eine glückliche politische Konstellation – Ost-West Tauwetter war ausgebrochen, und Fusionsforschung war, wie oben erwähnt, immer schon ein Pionier internationaler Zusammenarbeit – änderte dies aber grundlegend. So begann 1988 in mehreren Schritten die detaillierte Planung eines Experimentalreaktors – ITER – in Zusammenarbeit der Europäischen Union, Japans, der USA und der damaligen UdSSR (bzw. in ihrer Nachfolge Russlands). Die Eckpfeiler des Entwurfes standen fest: Divertor, D-förmiger Plasmaquerschnitt und supraleitende Spulen. Als Ziel wurde „Zündung“ anvisiert: nach dem Aufheizen sollte keine weitere Energiezufuhr an das Plasma nötig sein, um die Brenntemperatur aufrecht zu erhalten. Der immer zitierte Vielfältigungsfaktor der Leistung ($Q = \text{Fusionsleistung} / \text{externe Plasmaheizung}$) würde damit nominell gegen Unendlich gehen. Tatsächlich wird dies auch in einem Tokamak-Kraftwerk nie wirklich der Fall sein, da schon zur Regelung des Brennvorganges, aber vor allem zum Aufrechterhalten des Plasmastromes immer eine Wellen- oder Teilchenenergiezufuhr nötig sein wird, so dass $Q = 25 - 40$ eher typische Zieldaten für Reaktorentwürfe sind. ITER sollte aber ein Experiment und nicht der Prototyp eines Kraftwerkes werden, so dass weder ein echter Dauerbetrieb noch Stromproduktion vorgesehen waren.

Dass ITER aber von Anfang an nicht eine abstrakte Studie sondern ein konkretes Bauvorhaben war, illustriert auch die Tatsache, dass über 400 Millionen Euro für die Fertigung von Prototypen kritischer Komponenten aufgewandt wurden. Dabei kam auch ein starker österreichischer – sogar spezifisch Tiroler – Akzent auf, da die Firma Plansee eine weltweite Führungsposition auf dem Gebiet thermisch hochbelastbarer Werkstoffe und Komponenten einnimmt, und dieser Aspekt bei ITER die größte technologische Herausforderung darstellt.

Nach 10 Jahren Planung lagen die Blaupausen von ITER weitgehend bereit, aber es wurde auch klar, dass die abgeschätzten Baukosten von ungefähr 6 Milliarden Dollar (1998-Standard) den Partnern für eine reine Forschungsanlage zu teuer erschienen. Die Vereinigten Staaten stiegen 1999 völlig aus dem Projekt aus, und Europa, Japan und Russland beschlossen die Ausarbeitung einer weniger ambitionösen Anlage. Der Zielwert von Q wurde auf 10 reduziert, was ein physikalisch sinnvolles Ziel darstellt, da $1/5$ der Fusionsleistung (die in Form energiereicher He-Ionen anfällt) direkt zur Plasmaheizung dient, so dass, bei $Q=10$, die intrinsische Heizung die noch nötige Zusatzheizung um einen Faktor 2 übertrifft. Dieses abgeänderte Projekt fand nicht nur die Billigung der Projektanten, sondern bewog auch die Vereinigten Staaten wieder ins Team zurückzukehren. Wenig später schlossen sich die drei wirtschaftlich stärksten Staaten Asiens (Koreanische Republik, China und Indien) als neue Partner dem Unternehmen an. Blieb noch die schwierigste Entscheidung – über den Standort – die schließlich auf das Umfeld des etablierten Kernforschungszentrums Cadarache in Frankreich fiel. Im Oktober 2007 trat der ITER- Staatsvertrag in Kraft und die konkrete Phase des umweltbehördlichen Genehmigungsverfahrens für den Bau begann.

Parallel zu dieser ITER-Planung waren natürlich auch die experimentelle und theoretische Plasmaforschung weiter fortgeschritten. Da das in einem Reaktor benötigte Wasserstoffisotop Tritium radioaktiv ist, und sein Einsatz nur Sinn hat, wenn von Fusionsreaktionen auch ein signifikanter Beitrag zur Plasmaheizung zu erwarten ist, waren kleinere und mittelgroße Einschlussexperimente von vorneherein auf den Betrieb mit einfachem Wasserstoff („Protonium“) oder Deuterium beschränkt geblieben. JET und TFTR jedoch waren für einen radioaktiven Betrieb gerüstet, und produzierten, beginnend in 1991, abwechselnd Rekorde in Fusionsleistung (JET 1991: 1.7 MW, TFTR 1994: 10.7 MW, JET 1997: 16 MW), produzierter Energie und Q ($= 0.65$, JET 1997). Diese Experimente brachten auch ein neues physikalisches Problem ins Rampenlicht. Die Selbstheizung durch Kernfusion erfolgt nämlich durch Reaktionsprodukte, die bei Entstehung eine Geschwindigkeit besitzen, die über der Ausbreitungsgeschwindigkeit niederfrequenter Plasmawellen liegt. Während ihrer Abbremsung können sie daher in resonantem Energieaustausch Instabilitäten anregen, die sie aus dem Magnetkäfig auswerfen könnten, bevor sie mit ihrer gesamten Energie zur Plasmaheizung beigetragen haben. Eine endgültige Antwort auf die Frage, unter welchen Bedingungen diese Instabi-

litäten eine ausreichende Selbstheizung des Plasmas verhindern würden, kann aber erst ITER geben, und dies stellt daher auch sein wichtigstes physikalisches Untersuchungsziel dar.

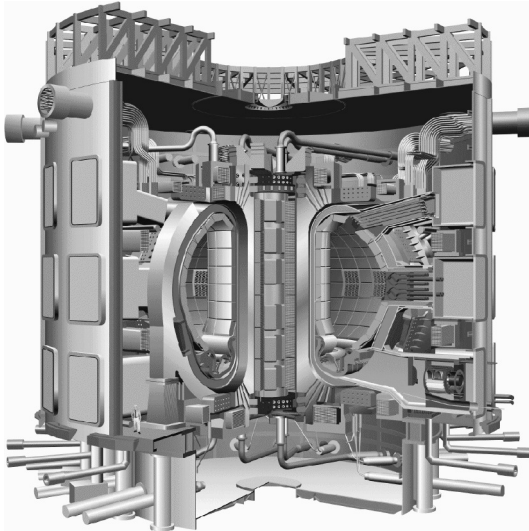


Abbildung 4.1.2:

Das ITER Experiment.

(Quelle: www.iter.org)

Der Tokamak besticht durch seine geometrische Einfachheit und hat daher auch einen großen Entwicklungsvorsprung vor anderen ernsthaft als Alternative diskutierten Konfigurationen. Ein Stellarator, mit einer viel komplexeren Geometrie, kann jedoch geschlossene Flussflächen ohne einen toroidalen Plasmastrom erzeugen, und wäre daher auch ohne aufwändigen Stromtrieb durch Wellen- oder Teilcheninjektion stationär betriebsfähig. Mit der Aufgabe der Axisymmetrie verliert man jedoch einen Erhaltungssatz der analytischen Mechanik, der (in Abwesenheit von Stößen und turbulenter Fluktuationen) jenen Einschluss energiereicher Teilchen garantiert, ohne den ein Fusionsreaktor undenkbar ist. Alan Boozer und Jürgen Nührenberg aber gelang es Anfang der 80er Jahre zu zeigen, dass unter bestimmten Bedingungen – in so genannten quasisymmetrischen Anordnungen – auch allgemein dreidimensionale Magnetfeldkonfigurationen einen dem Tokamak vergleichbaren Einschluss von Einzelteilchen besitzen können. Die tatsächliche Identifizierung derartiger Konfigurationen war eine Pioniertat der computergestützten Physik, und brachte den Stellarator – wenn auch mit ein paar Runden Rückstand – wieder ins Rennen. Ein nach diesen Kriterien entworfenes Großexperiment – W7-X – ist gegenwärtig in Greifswald (Deutschland) in Bau, und wird 2014 in Betrieb gehen.

Außer im Zusammenhang mit dem Stellarator wurde hier bisher wenig über Theorie gesagt. Sie spielte aber natürlich eine große Rolle in der Darwinschen Selektion der Einschlusskonfi-

gurationen. Das Gleichgewicht eines kreisförmigen Tokamaks ist recht einfach zu berechnen, und erst nicht-kreisförmige Plasmaquerschnitte und Divertoranlagen erforderten aufwändigere Rechenprogramme. Die nutzbaren Einschlusskonfigurationen und Parameterregime sind jedoch eng begrenzt durch Plasmainstabilitäten, die so vielfältiger Natur sind, dass ein eigenes, mehrbändiges Handbuch (verfasst vom Nestor der Innsbrucker Plasmaphysik, Ferdinand Cap) darüber existiert. Großskalige – so genannte MHD - Instabilitäten bilden im Allgemeinen harte Grenzen an Plasmastrom oder Plasmadruck. Diese Grenzen sind zwar als Energieprinzip mathematisch elegant formulierbar, aber sehr komplex auszuwerten. Die gute Übereinstimmung der Experimente mit den aus Rechnungen gewonnenen Vorhersagen war in den 70er und 80er Jahren ein sehr überzeugender Triumph der Plasmatheorie.

Kleinskalige Instabilitäten bilden zwar keine harten Grenzen, sind aber die treibenden Kräfte hinter einer vielgestaltigen Turbulenz, die den Energieverlust aus dem Plasma – und damit den erreichbaren Wert von Q – bestimmt. Hier hat die Plasmatheorie erst im letzten Jahrzehnt dramatische Fortschritte gemacht. Auf der einen Seite wurden glaubhafte ab-initio Modelle entwickelt, die ein quasineutrales, fast stoßfreies Plasma in einem starken, inhomogenen Magnetfeld mit einem erweiterten Flüssigkeits- oder einem eingeschränkten kinetischen Ansatz beschreiben können. Der Fortschritt betraf aber vor allem auch die Umsetzung dieser Modelle in Codes, die moderne, hoch parallele Computerarchitekturen effektiv nutzen. Die Erwartung ist groß, dass es parallel zu ITER auch einen „numerischen“ Tokamak geben wird, und daher plant die Europäische Union gegenwärtig auch die Förderung eines für die Fusionsforschung dedizierten Höchstleistungsrechners. In seiner Nachfolge wird dann, im Jahre 2012, ein gemeinsam mit Japan errichtetes Fusionsrechenzentrum in Rokkasho in Betrieb gehen – an jenem Ort, der ursprünglich Standortkandidat für ITER war.

Fusionsforschung und Fusionsenergie wurden häufig als ein Reservat der hoch industrialisierten Länder angesehen, und damit als zu komplex für jene Gebiete der Erde abgetan, in denen in Zukunft der größte Bedarfszuwachs an Energie bestehen wird. Diese Kritik verkannte aber die Tatsache, dass der starke Zuwachs des Energiebedarfs erst synchron mit dem industriellen Aufstieg eines Landes entsteht, das in diesem Prozess automatisch auch den für die Fusionsforschung notwendigen technischen Standard erreicht. Es ist bezeichnend, dass Korea, China und Indien, die mit unterschiedlichem Phasenverzug diesen Aufstieg erlebt haben, nicht nur Mitglieder des ITER-Verbundes wurden, sondern auch im Begriff sind, eigene nationale Fusionsanlagen fortschrittlichster Bauart in Betrieb zu nehmen. Zusammen genommen repräsentieren die am Projekt ITER selbst mitarbeitenden Staaten mehr als die Hälfte der Erdbevölkerung. Nie zuvor hat sich ein vergleichbarer Anteil der Menschheit an einem gemeinsamen Arbeitsprojekt beteiligt.

50 Jahre "Atome für den Frieden": 1958 - 2008

Im Oktober 2008 fand im Palast der Nationen in Genf die 22. *IAEA Fusion Energy Conference* statt, bei der 50 Jahre weltweite friedliche Fusionsforschung gefeiert und der aktuelle Stand der Wissenschaft im Rahmen einer Fachtagung diskutiert wurden.

Das Ereignis erinnerte an die berühmte *Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy* am selben Ort im Jahr 1958, besser bekannt als "Atoms for Peace" Konferenz. An der Tagung nahmen damals 61 Länder teil, von denen 21 Länder eigene Konzepte zu Fusionsexperimenten, Spaltreaktoren, sowie alternative Konzepte und neue Modelle für Kernkraftwerke vorstellten. Zu diesem Anlass gaben die Sowjetunion, Großbritannien und die USA erstmals ihre Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Kernfusion öffentlich frei und waren bereit, ihre bisherigen Ergebnisse und Erfahrungen mit dem Rest der weltweiten Forschungsgemeinde zu teilen. Damit wurde der wesentliche Grundstein für das Bewusstsein gelegt, welche enormen wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen bei der Nutzung der Kernfusion noch zu bewerkstelligen sein würden, um sie eines Tages als praktisch unerschöpfliche und saubere Energiequelle nutzen zu können.

Auf der historischen Tagung im Jahr 1958 war Prof. Ferdinand Cap von der Universität Innsbruck als österreichischer Delegierter vertreten und erhielt dort wertvolle Anregungen für die folgenden eigenen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Plasmaphysik und Fusionsforschung, welche eben damals am Institut für Theoretische Physik in Innsbruck - und damit auch erstmals überhaupt auf diesem Fachgebiet in Österreich - gerade begannen.

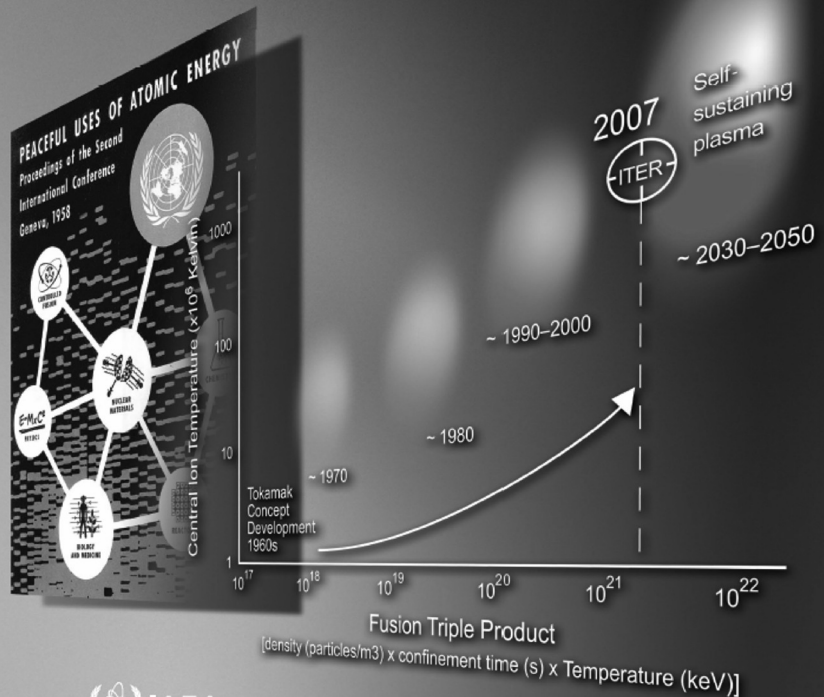
Auf der 22. Fusionsenergiekonferenz im Jahr 2008 nahmen, nun zu Zeiten des Baus des ersten "brennenden" Fusionsexperiments ITER in Europa, drei Delegierte der Republik Österreich teil, vertreten durch Ao. Univ.-Prof. Dr. Klaus Schöpf und Dr. Victor Yavorskij vom Institut für Theoretische Physik und PD Dr. Alexander Kendl vom Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik der Universität Innsbruck.

(A. Kendl)


Abb. 4.1.3 (rechte Seite): Plakat zur "22nd IAEA Fusion Energy Conference" vom 13.-18. Oktober 2008 in Genf, einer von vielen internationalen Fachtagungen unter aktiver Beteiligung von Innsbrucker Plasmaphysikern.

22nd IAEA Fusion Energy Conference

13–18 October 2008
Geneva



Organized by the  **IAEA**
International Atomic Energy Agency

Hosted by the  Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Swiss Confederation

through the Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Association Euratom-Confédération Suisse
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

4.2 Europäische Fusionsforschung in Österreich: Die Assoziation EURATOM-ÖAW an der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Univ.-Prof. Dr. Dr.h.c. Harald W. Weber

Atominstitut der Österreichischen Universitäten,
Stadionallee 2, 1020 Wien

Die Assoziation EURATOM-ÖAW koordiniert seit ihrer Gründung im Jahr 1996 alle österreichischen F&E Projekte zum Thema Kernfusionsforschung an Universitäten, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und in einschlägig tätigen Industrieunternehmen. Als Trägerorganisation fungiert die Österreichische Akademie der Wissenschaften unter der Schirmherrschaft des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung.

Die Universität Innsbruck – eine langjährige Partnerinstitution

Die Universität Innsbruck leistet seit Bestehen der Assoziation EURATOM-ÖAW international anerkannte Beiträge auf den Gebieten der Plasmatheorie (Modellierung und Computersimulation, Institut für Theoretische Physik, S. Kuhn, K. Schöpf), Plasma-Wand-Wechselwirkung (Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, T. Märk) und Plasmadiagnostik (Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, R. Schrittwieser).

An dieser Stelle ist besonders die Rolle von Prof. Ferdinand Cap für das Zustandekommen der Assoziation EURATOM-ÖAW hervorzuheben. Wie der damalige Head of Research Unit, Prof. Hannspeter Winter, anlässlich eines Festkolloquiums zum 80. Geburtstag von Ferdinand Cap im September 2004 ausführte, kann Cap „...ohne jede Einschränkung als ‚Doyen der österreichischen Plasmaphysik‘ bezeichnet werden; er hat sich bereits frühzeitig und teilweise gegen starke Widerstände für eine maßgebliche Beteiligung österreichischer Wissenschaftler an der internationalen Fusionsforschung eingesetzt, hat dazu entsprechende Studien und Memoranden verfasst, zahlreiche Vorträge im In- und Ausland gehalten, Kooperationen angeregt und schließlich lange Jahre in der Kommission zur Koordinierung der Kernfusionsforschung an der österreichischen Akademie der Wissenschaften mitgewirkt. Die wertvollen Beiträge der Innsbrucker Plasmaphysik zur internationalen Fusionsforschung in experimentellen wie theoretischen Teilgebieten seit Gründung der Assoziation im Jahre 1996 sind zu einem guten Teil durch diese unermüdlichen Bemühungen angeregt worden.“

Die wichtigsten Forschungsgebiete der Assoziation EURATOM-ÖAW liegen in den Bereichen Plasmaphysik (Modellierungen, Transport, Turbulenzen, Plasmarandschicht), Fusions-technologie (Materialforschung, Divertor, supraleitende Magnetspulen) und sozioökonomische Studien (Risikomanagement, Entwicklung von Energiemodellen und Szenarien, Potentialanalysen von Ressourcen). Beteiligte Forschungsinstitute sind die Technische Universität Wien, das Atominstitut der Österreichischen Universitäten, die Technische Universität Graz, das Erich-Schmid-Institut für Materialwissenschaft der ÖAW in Leoben, die Universität Wien, die Universität Innsbruck sowie die Universität Salzburg. Die Assoziation pflegt darüber hinaus engen Kontakt mit namhaften österreichischen Unternehmen und der Österreichischen Wirtschaftskammer, um einschlägig tätige Industriebetriebe über neueste Entwicklungen und Perspektiven zu informieren.

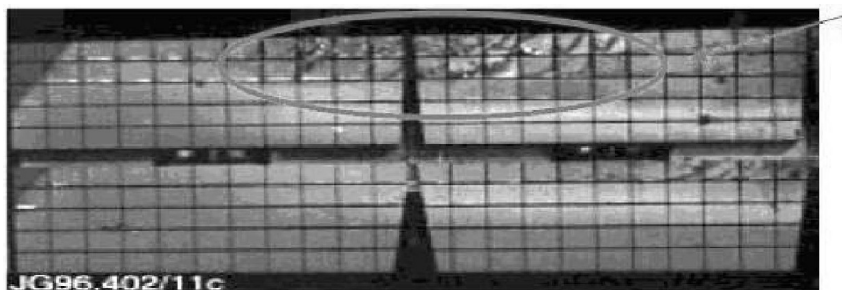


Abb. 4.2.1: Materialschäden durch ELM-Ereignisse (Edge Localized Modes). ELM-Ereignisse stören die Plasmaperipherie, wodurch enorme Belastungen am Divertor und an anderen Wandflächen einer Kernfusionsanlage entstehen. Modellierungen mit speziell entwickelten Computer Codes sollen helfen, diese Schäden zu quantifizieren und zu minimieren. Quelle: EFDA Garching.

Durch die Einigung auf den Standort des „next-step“ Experiments ITER, das die wissenschaftliche und technologische Nutzbarkeit der Kernfusion zur Stromerzeugung demonstrieren und 500 MW Fusionsenergie erzeugen soll, auf das französische Cadarache sowie die im Dezember 2006 erfolgte Unterzeichnung des ITER-Vertrages durch die sieben Partner (EU, China, Indien, Japan, Korea, Russische Föderation, USA) befindet sich die internationale Fusionsforschung in einer neuen und entscheidenden Phase. Durch den Bau von ITER ergeben sich nicht nur für die österreichische Forschungslandschaft, sondern auch für die österreichische Industrie vielfältige und langfristige Möglichkeiten der Beteiligung. Die Assoziation EURATOM-ÖAW wird sich in Zukunft – neben ihren bisherigen Aufgaben – besonders um die Weitergabe und Aufbereitung dieser Informationen bemühen.

Das 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union im Bereich Fusionsforschung ist in verstärktem Maße auf internationale Kooperationen und ITER ausgerichtet. Es ist ein erklärtes Ziel der europäischen Fusionsforschung, das wissenschaftliche Know-How in den EURATOM Assoziationen für die Dauer der ITER-Bauphase und danach durch die Qualifizierung von hoch spezialisierten Forschern und Technikern zu erhalten und zu stärken. Die Einbindung und Förderung von jungen Forschern und Technikern war stets auch ein wichtiges Anliegen der Assoziation. So werden im Durchschnitt 35 Doktoranden und Post-Docs pro Jahr aus den Mitteln der EU Fusionsförderung angestellt. Die Forschergemeinschaft der Assoziation EURATOM-ÖAW ist durch zahlreiche internationale Kooperationen und langjährige Mitarbeit bei gemeinsamen europäischen Aktivitäten (z.B. EFDA Task-Forces, Teilnahme an den Experimenten bei JET) für zukünftige Entwicklungen, insbesondere im Zusammenhang mit Bau und Betrieb von ITER, gut vorbereitet. Die konstruktive Mitarbeit der Universität Innsbruck wird auch in Zukunft von entscheidender Bedeutung sein.

Forschung im Rahmen der Assoziation EURATOM-ÖAW

Plasmatheorie (Modellierung, Transport, Simulation)

An der Universität Innsbruck arbeiten Prof. Siegbert Kuhn und Dr. David Tskhakaya am Institut für Theoretische Physik und PD Dr. Alexander Kendl am Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik an der Interpretation von experimentellen Ergebnissen aus Fusionsforschungsanlagen. Die Gruppen um Prof. Kuhn und PD Dr. Kendl sind in die Aktivitäten der europäischen Task Force “Integrated Tokamak Modelling” und zahlreiche internationale Kooperationen eingebunden. Die Gruppe um Prof. Klaus Schöpf (ebenfalls Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck) ist auf die Modellierung von schnellen Ionen in Tokamak- und Stellaratorplasmen spezialisiert. Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Erklärung von Transportmechanismen von schnellen Ionen. Im Rahmen dieser Arbeit werden experimentelle Ergebnisse der Fusionsforschungsanlage JET mit dem Ziel analysiert, daraus Vorhersagen auf das Transportverhalten von schnellen Ionen in ITER abzuleiten.

Prof. Gerald Kamelander, vormaliges Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf, seit 2005 selbständig, analysiert mit einer Gruppe junger Forscher fortgeschrittene ITER Plasma-Szenarien und führt Simulationen zur Plasmaheizung mit Pellets durch. Auch diese Gruppe arbeitet in enger Kooperation mit JET und CEA in Cadarache.

Die Gruppe um Prof. Winfried Kernbichler (Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Graz) entwickelt neue numerische Methoden und schnelle Computer Codes für die Untersuchung von Plasmatransport und Plasmaheizung in Zusammenarbeit mit FZ Jülich, IPP Greifswald und IPP Kharkov.

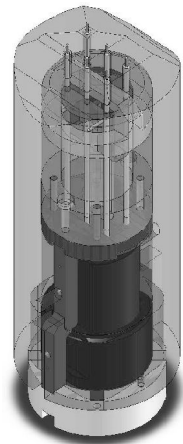
Plasmarandschicht und Diagnostik

Die Randschicht eines magnetisch eingeschlossenen Plasmas ist durch sehr unterschiedliche Dichte- und Temperaturverhältnisse gekennzeichnet. Der Transport von Teilchen aus dem Inneren des Plasmas wird sehr stark von Verunreinigungen in der Randschicht beeinflusst; die Entstehung dieser Verunreinigungen hängt wiederum sehr stark von den Bedingungen in der Plasmarandschicht ab.

Prof. Friedrich Aumayr (Institut für Allgemeine Physik, Technische Universität Wien) entwickelt mit seiner Gruppe schnelle Heliumstrahlspektroskopie und Natriumstrahldiagnostik in Zusammenarbeit mit JET und ASDEX Upgrade. Weitere Forschungsgebiete dieser Gruppe sind Modellrechnungen und die Untersuchung von Molekülstößen mit fusionsrelevanten Oberflächenmaterialien in Zusammenarbeit mit Prof. Tilmann Märk und Prof. Paul Scheier (Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, Universität Innsbruck). Weitere Spezialgebiete der Gruppe um Prof. Märk sind Messungen und Modellierung von Wirkungsquerschnitten für Elektronen- und Protonenstoß-Ionisierung von fusionsrelevanten Atomen und Molekülen (z.B. Wolfram).

Prof. Roman Schrittwieser (Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, Universität Innsbruck) und seine Gruppe führen Messungen von Plasmapotential und Plasmaturbulenz mit Hilfe von speziell entwickelten Sonden an mehreren europäischen Fusionsexperimenten (z.B. ASDEX Upgrade) durch.

Abb. 4.2.2: Sonden für die Messung von Plasmaparametern (elektrische Feldmessung in der Plasmarandschicht von ASDEX Upgrade, IPP Garching). Aus den Ergebnissen der Messungen können Werte für Turbulenzen im Randschichtplasma abgeleitet werden. Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik.



Technologische Entwicklung

Test neuartiger Isolationsmaterialien für die ITER Magnete

Da die derzeit verfügbaren Isolationsmaterialien der im ITER Design Report festgelegten Neutronenfluenz nicht standhalten (Abb. 3), beschäftigt sich eine Gruppe unter der Leitung von Prof. Harald W. Weber (Atominstitut, Technische Universität Wien) mit der Entwicklung von neuartigen Isolationsmaterialien für die Magnetsysteme von ITER und Demo, die von der Industrie gefertigt und im Triga Reaktor des Atominstututs getestet und analysiert werden.

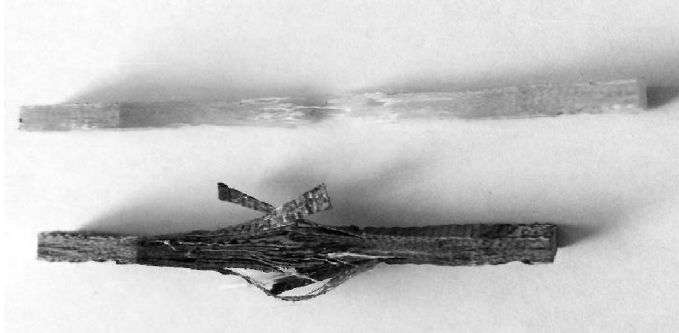


Abb. 4.2.3: Bruchverhalten nach Zugbelastung bei 77 K eines konventionellen Glasfaser – Epoxydharz Verbundwerkstoffs vor (oben) und nach (unten) Neutronen- und Gammabestrahlung zur ITER „Designfluenz“ von $1 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$). Quelle: Atominstytut.

Hochtemperatursupraleiter für Fusionsmagnete

Hochtemperatursupraleiter sind für den Einsatz im Magnetsystem einer Fusionsanlage auf Grund ihres hohen kritischen Magnetfeldes und der ausgezeichneten Strombelastbarkeit bei tiefen Temperaturen besonders geeignet. Eine Gruppe unter der Leitung von Prof. Harald W. Weber (Atominstytut, Technische Universität Wien) untersucht die Materialeigenschaften verschiedener Supraleiter mit besonderem Augenmerk auf die kritische Stromdichte unter realistischen Betriebsbedingungen zukünftiger Kernfusionsanlagen, wie z.B. DEMO.

Analyse von hochschmelzenden Werkstoffen

Wolframlegierungen sind aufgrund ihrer Hitzebeständigkeit Kandidatenmaterialien für die erste Wand in zukünftigen Fusionsanlagen. Im Rahmen eines Projekts unter der Leitung von Prof. Reinhard Pippan (Erich-Schmid-Institut, Leoben, Österreichische Akademie der Wissenschaften) wird untersucht, inwieweit die Duktilität von Wolframlegierungen durch mechanische Bearbeitung (Ziehen, Walzen) verbessert werden können.

Am Atominstytut untersucht eine Gruppe unter der Leitung von Prof. Helmut Rauch die Auswirkung von Neutronen- und Gamma-Strahlung auf Siliziumkarbidproben.

Evaluation von Kerndaten

Das Ziel dieses Projekts (Prof. Helmut Leeb, Atominstytut, Technische Universität Wien) ist die Entwicklung theoretischer Methoden für die Erstellung von evaluierten Kerndaten-Files bis 60 MeV (Energiebereich der geplanten Neutronenquelle IFMIF).

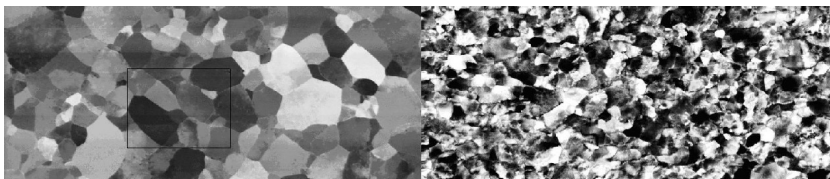


Abb. 4.2.4: Struktur von reinem Wolfram, links: vor, rechts: nach mechanischer Behandlung (severe plastic deformation). Quelle: ÖAW-ESI.

Sozioökonomische Studien

Sozioökonomische Begleitstudien erfolgen in Zusammenarbeit mit EFDA Garching zu den Themen öffentliche Meinung, Einschätzung von Risiken, und zukünftige Energieszenarien (Universität Wien, Technische Universität Graz, Universität Salzburg).

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der beteiligten Institutionen, insbesondere jedoch den „Innsbruckern“, meinen aufrichtigen Dank für ihre konstruktive Mitarbeit an den EURATOM Programmen der österreichischen Assoziation aussprechen. Mein besonderer Dank gilt Frau Mag. Monika Fischer und Mag. Andreas Sumper, die für einen reibungslosen Ablauf der Administration unserer Assoziation sorgen, sowie Frau Mag. Monika Fischer für die Zusammenstellung der Eckdaten dieses Beitrages.

Persönlichkeiten

	<p>Univ.-Prof. Dr. Harald W. Weber Head of Research Unit der Assoz. EURATOM-ÖAW; Vorstand, Atominstitut (TU Wien), Stadionallee 2, 1020 Wien</p>		<p>Univ.-Prof. Dr. Hannspeter Winter (1941 - 2006) Head of Research Unit der Assoz. EURATOM-ÖAW vom Tag der Gründung (15.11.1996) bis 8.11.2006</p>
---	---	---	--

Anmerkung: Die Forschungsarbeit im Rahmen der Assoziation EURATOM-ÖAW erfolgt im Rahmen des European Fusion Development Agreement (EFDA) und wird gemäß den Bestimmungen des Assoziationsvertrags zwischen EURATOM und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften von der Europäischen Kommission unterstützt. Der Inhalt dieses Artikels entspricht nicht notwendigerweise der Position der Europäischen Kommission.

4.3 Ionen- und Plasmaphysik / Angewandte Physik - ein Schwerpunkt aus dem Fachbereich Physik

Univ.-Prof. Mag. Dr. Paul Scheier

Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, Universität Innsbruck

Schwerpunktleiter: Univ.-Prof. Mag. Dr. Paul Scheier

Stellvertreter: Ao. Univ.-Prof. Dr. Klaus Schöpf

Aufbauend auf den durch den FWF von 1973–1984 finanzierten „Schwerpunkt Plasmaphysik“ am Institut für Theoretische Physik wurde durch die Schaffung des Institutes für Ionenphysik im Jahre 1987 und durch nachfolgende Beschlüsse in der Fachgruppe Physik das Fachgebiet Ionenphysik / Plasmaphysik als ein zentrales Arbeitsgebiet der Innsbrucker Physik installiert, wobei die Teilgebiete Elementarprozesse in Plasmen, Theoretische und Experimentelle Plasmaphysik, Clusterphysik und Gasanalyseverfahren besonders erfolgreich erforscht werden. Im Jahre 1998 wurde die Arbeitsgruppe Dünne Schichten in das Institut für Ionenphysik eingegliedert, die mit ihren Untersuchungen von plasmaunterstützten Prozessen die Grundlage für anwendungsorientierte innovative Technologie liefert. Im Rahmen der Profilbildung der Universität Innsbruck wurde im Jahr 2004 auf der Basis der zahlreichen bisher erarbeiteten Ergebnisse der institutsübergreifende Forschungsschwerpunkt Ionen- und Plasmaphysik / Angewandte Physik errichtet.

Ziel des institutsübergreifenden Forschungsschwerpunktes sind experimentelle und theoretische Untersuchungen, die zum grundlegenden physikalischen Verständnis der Erzeugung und der Eigenschaften von einzelnen Ionen führen, bis hin zur genauen Beschreibung des kollektiven Verhaltens von Ionen und Elektronen in verschiedenen elektrischen und magnetischen Feldkonfigurationen unter selbstkonsistenter Berücksichtigung aller wesentlichen Aspekte und Komponenten (wie materielle Begrenzungen, äußere Schaltkreise, Stromprofile, stoß- und fluktuationsbedingte Transportphänomene, Reaktionskinetik, Plasmaheizung, magneto-hydrodynamische Aktivitäten). Dabei wird auf enge Zusammenarbeit zwischen Theorie, Experiment und Computersimulation Wert gelegt. Besonders intensiv wird Grundlagenforschung zu Themen wie Elektronenwechselwirkung (Attosekunden-Physik), Massenspektrometrie, Clusterphysik, Fusionsphysik und technische Plasmaphysik betrieben. Andererseits reichen die Forschungsarbeiten auch in die anwendungsbezogenen Bereiche wie Energiephysik und Umweltforschung (Ozon, Treibhauseffekt, Feinstaub), Nanotechnologie, Materialwissenschaft, Strahlenschäden an Biomolekülen und Medizintechnik.

Der Forschungsschwerpunkt Ionen- und Plasmaphysik / Angewandte Physik ist institutsübergreifend (Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik und die Arbeitsgruppe Plasma- und Energiephysik (AG PEP) am Institut für Theoretische Physik) und beschäftigt sich mit folgenden zentralen Arbeitsgebieten:

- Erzeugung, Eigenschaften und Nachweis von einzelnen Ionen
- Ionen-Molekülreaktionen
- Biophysik
- Nano- und Clusterphysik
- Umweltphysik und atmosphärische Chemie
- Ultrakalte Chemie, Erzeugung und Eigenschaften von zustandsselektierter Ionen
- Plasmaphysik
- Kollektives Verhalten von Ionen und Elektronen in komplexen Kraftfeldern
- Modellierung und Simulation von magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasmen
- Grundlegende und fusionsrelevante Untersuchungen zum Plasma-Wand-Übergang
- Integrierte Tokamak-Modellierung und Theorie emissiver Sonden
- Dünnschichttechnologie
- Hochfrequenztechnik
- Medizintechnik

Aufgrund der großen Praxisnähe und Aktualität der bearbeiteten Forschungsthemen gibt es enge Kontakte zu sehr erfolgreichen wirtschaftlichen Betrieben im Raum Tirol, wie Metallwerke Plansee, Ionicon analytik GmbH, Rohbest Coating GmbH, Sun Systems, Swarovski und TIWAG. Momentan werden 15 DiplomandInnen und 33 DissertantInnen in den Arbeitsgruppen des Forschungsschwerpunkts ausgebildet (Tendenz steigend), was auf die hohe Attraktivität der bearbeiteten Forschungsthemen für StudentInnen hinweist. Durch Einwerben von Drittmitteln aus nationalen und internationalen Quellen ist es möglich 58 wissenschaftliche Mitarbeiter (insgesamt 38 volle Stellen) zu beschäftigen. Eine große Zahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen in sehr renommierten Journalen (Science, Physical Review Letters, Angewandte Chemie Int. Ed., The Journal of the American Chemical Society, u.a., siehe "Ausgewählte Veröffentlichungen") belegt die hervorragenden Forschungsleistungen.

Die betreffenden laufenden Forschungsarbeiten werden auf nationaler Ebene über FWF, FFF, ÖAW, ÖNB, CAST (Center of Academic Spin Off Tirol), LISA (Life Science Austria), KMT (Kompetenzzentrum Medizintechnologie), Tiroler Zukunftsstiftung und international im Rahmen von EU-Projekten, NSF (National Science Foundation) und NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) gefördert. Insgesamt betragen die eingeworbenen Förderungen in etwa 3 Millionen Euro pro Jahr. Auf europäischer Ebene ist der Schwerpunkt Ionen- und Plasmaphysik (Angewandte Physik) in insgesamt **10** Netzwerke eingebunden sowie

in die Assoziation Euratom/ÖAW des Europäischen Fusionsprogrammes (5 der 8 Physikprojekte dieser Assoziation werden in Innsbruck durchgeführt), was die enorme Bedeutung dieses Forschungsgebietes innerhalb der europäischen Forschungslandschaft aufzeigt. Weiters gibt es aktive Kooperationen und Kontakte zum Forschungsschwerpunkt "Advanced Materials" der Universität Innsbruck. Außerhalb Europas dokumentiert sich die Anerkennung unserer Arbeiten durch die Kooperationen mit zahlreichen renommierten Forschungsinstitutionen (Goddard Space Flight Center, Japan National Institute for Fusion Science, Kiev Institute for Nuclear Research, NCAR, NOAA, McMaster University, Princeton Plasma Physics Laboratory, Purdue University, Tohoku University Sendai, University of Illinois Fusion Studies Laboratory, University of California at Berkeley u. a.).

Die ständig steigende Anzahl von in- und ausländischen DiplomandInnen und DissertantInnen (derzeit 48), GastforscherInnen und GastprofessorInnen auf den oben angeführten Fachgebieten belegt die große Ausstrahlung der Innsbrucker Physik Institute, des Forschungsschwerpunktes Ionen- und Plasmaphysik. Aufgrund der zahlreichen Vortragseinladungen zu internationalen Tagungen (etwa 30 pro Jahr) ist der Bereich Ionen- und Plasmaphysik / Angewandte Physik im Fachbereich Physik als ein international äußerst renommierter und sichtbarer Schwerpunkt einzustufen (siehe auch Editorentätigkeiten in Zeitschriften).

Die hervorragende Forschungsleistung wird auch (neben der Verfassung eines modernen Lehrbuches) durch die große Zahl an qualitativ ausgezeichneten Publikationen belegt (174 Arbeiten in referierten Journalen mit einem Gesamtimpaktfaktor von über 600 und über 350 Zitationen in den letzten drei Jahren bei nur 10 involvierten Hochschullehrern an den beiden Instituten). Aufgrund der hohen Relevanz der Forschungen ist es zu zahlreichen Zeitungsartikeln und Interviews in Radio und TV gekommen. In den letzten Jahren erhielten zwei Mitglieder des Schwerpunktes den Erwin-Schrödinger-Preis der Akademie der Wissenschaften, vier Ehrendoktorate wurden an drei Mitglieder verliehen, zwei wurden zu Honorarprofessoren ernannt, und mehrere ehemalige Absolventen wurden auf Lehrstühle an Universitäten bzw. als CEO großer Unternehmungen im In- und Ausland berufen.

Neben 9 Diplomarbeiten und 19 Dissertationen haben Dr. Sara Matt-Leubner und Dr. Alexander Kendl in den letzten drei Jahren ihre Habilitationen erfolgreich abgeschlossen. 2005 erhielt A. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Clemens Zierhofer als erster Österreicher den Karl Heinz Beckurts-Preis.

Als besonders wichtiger Spin-off-Effekt zu erwähnen ist die Gründung mehrerer erfolgreicher High-Tech Unternehmungen im Raum Tirol durch (auch ehemalige) Mitglieder des Instituts für Ionenphysik (V&F, Watercryst chemiefreie Wasserbehandlung GmbH, Ionicon analytik GmbH, PhysTech, Ionimed), was nicht nur zur Erhöhung des BNP, sondern auch zur Schaffung von Arbeitsplätzen für Absolventen führt.

Personalstand des Forschungsschwerpunkts Ionen- und Plasmaphysik / Angewandte Physik per 31.12.2007:

Univ. Prof.	2
Univ. Doz.	8
V. Ass.	3
Sonstige Bedienstete	5
Drittmittelstellen	38
Anzahl der Bediensteten	58

- Drittmittelinwerbung in den letzten drei Jahren: 10.2 Millionen Euro;
- Studentenzahlen und Abschlüsse pro Jahr: insgesamt 38/10;
- Patente in den letzten drei Jahren: 3.
- Wissenschaftliche Veröffentlichungen in den letzten drei Jahren: 174 (davon 15 mit einem Impaktfaktor größer als 5)

Ausgewählte Publikationen der letzten drei Jahre:

1. S. Denifl et al., Inelastic Electron Interaction with Chloroform Clusters embedded in Helium Droplets. *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008) 5065
2. F. Zappa, et al., Ultracold Water Cluster Anions. *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008) 5573
3. H. D. Flosadottir et al., Combined Experimental and Theoretical Study on the Nature and the Metastable Decay Pathways of the Amino Acid Ion Fragment [M-H]⁻. *Angew. Chem. Int. Ed.* **46** (2007) 8057
4. S. Denifl et al., Influence of Functional Groups on the Site-Selective Dissociation of Adenine upon Low-Energy Electron Attachment. *Angew. Chem. Int. Ed.* **46** (2007) 5238
5. I. Mähr, et al., Multiply Charged Neon Clusters. Failure of the Liquid Drop Model? *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 023401
6. S. Denifl, et al., Mass Spectrometric Investigation of Anions Formed upon Free Electron Attachment to Nucleobase Molecules and Clusters Embedded in Superfluid Helium Droplets. *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 043201
7. S. Ptasinska, et al., Decomposition of Thymidine by Low-Energy Electrons. Implications for the Molecular Mechanisms of Single-Strand Breaks in DNA. *Angew. Chem. Int. Ed.* **45** (2006) 1893

8. S. Ptasinska, et al., Bond- and Site-Selective Loss of H⁻ from Pyrimidine Bases. *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 093201
9. S. Ptasinska, et al., Bond-Selective H⁻ Ion Abstraction from Thymine. *Angew. Chem. Int. Ed.* **44** (2005) 1647
10. S. Ptasinska, et al., Bond- and Site-Selective Loss of H Atoms from Nucleobases by Very-Low-Energy Electrons (<3 eV). *Angew. Chem. Int. Ed.* **44** (2005) 6941

Forschungspreise und Ehrungen:

- Markus Hörhager, 1986: Promotion sub auspiciis praesidentis
- Univ.-Doz. Dr. Siegbert Kuhn, Sept. 1992: Verleihung des Berufstitels "außerordentlicher Universitätsprofessor" durch den Bundespräsidenten
- Univ.-Prof. Dr. Tilmann Märk, Erwin-Schrödinger-Preis der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (1994).
- Univ.-Prof. Dr. Werner Lindinger, Erwin-Schrödinger-Preis der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (1997).
- Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Paul Scheier, Forschungspreis des Fürstentums Liechtenstein (2002).
- Ao. Univ.-Prof. Dr. Siegbert Kuhn, Honorarprofessur der Alexandru-Ioan-Cuza-Universität in Iași, Rumänien (2003).
- Ao. Univ.-Prof. Dr. Roman Schrittwieser, Honorarprofessur der Alexandru-Ioan-Cuza-Universität in Iași, Rumänien (2003).
- Univ.-Prof. Dr. Tilmann Märk, Ehrendoktorat der Université Claude Bernard in Lyon, Frankreich (2004)
- Univ.-Prof. Dr. Tilmann Märk, J. Heyrosvsky Ehrenmedaille der Tschechischen Akademie der Wissenschaften (2004)
- Univ.-Prof. Dr. Erwin Hochmair, Ehrendoktorat der TU München, Deutschland (2004)
- PD. Dr. Ingeborg Hochmair-Desoyer, Ehrendoktorat der TU München, Deutschland (2004)
- Ao. Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. Clemens Zierhofer, Karl Heinz Beckurts-Preis, Deutschland (2005)
- Univ.-Prof. Dr. Tilmann Märk, Ehrendoktorat der Comenius-Universität Bratislava, Slowakei (2006)
- Dr. Stephan Denifl, APART Stipendium der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (2008).

Abb. 4.3.1: Das Victor-Franz-Hess-Haus am Standort Technikerstraße der Universität Innsbruck am Fuße der Nordkette beherbergt derzeit die Labor- und Büroräume der Innsbrucker Ionen- und Plasmaphysik. (Foto: A. Kendl)



5

Aktuelle Forschung und Perspektiven **Laufende Projekte 2008**

5.1 Plasmatheorie

AG Plasma- und Energiephysik, Institut für Theoretische Physik

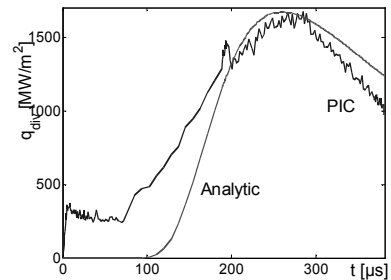
Leitung: Ao. Univ.-Prof. Hon.-Prof. Dr. Siegbert Kuhn

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

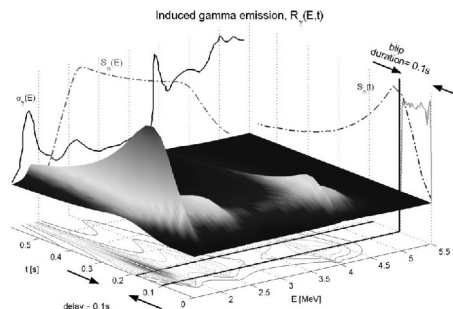
Wir untersuchen die Auswirkung eines periodisch gestörten toroidalen Magnetfeldes auf Transport, Verteilung und Verlust von energetischen Ionen bei Experimenten mit verstärkten Feldrippeln am Joint European Torus (JET). Das Verhalten von energetischen Ionen wird mit unserem 3D COM Fokker-Planck Code 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 Plasmameter 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 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:

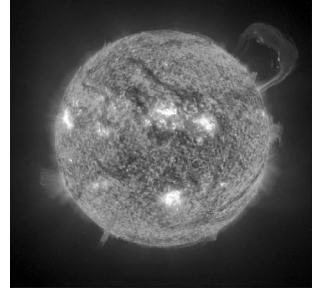
- Kiev Institute for Nuclear Research, Ukrainian Academy of Sciences, Kiev, Ukraine.
- JET/Culham Science Centre, Abingdon, U.K.
- CEA Département de Recherches sur la Fusion Contrôlée, Cadarache, Frankreich.
- Institute for Advanced Energy Systems, Department of Engineering Physics and Mathematics, 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-

enschaften 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-hara, Japan
- Institute of Experimental Physics, Slovakia Academy of Sciences, Kosice, Slovakia

5.4 Komplexe Systeme

Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik

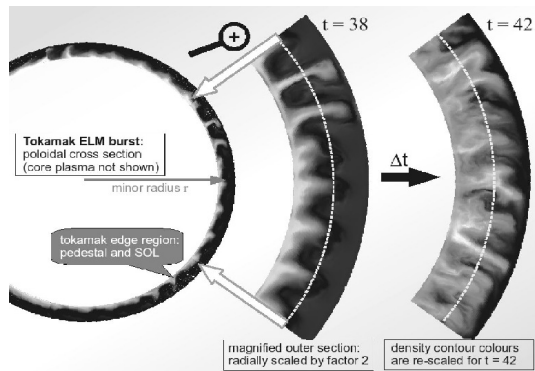
Leitung: Priv.-Doz. Dr. Alexander Kendl

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*

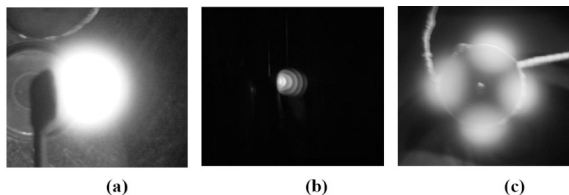
Die Erforschung von Turbulenzphänomenen ist von zentraler Bedeutung für künftige Fusionsexperimente. Im Rahmen des europäischen Fusionsforschungsprogramms arbeitet die Innsbrucker Experimentelle Plasmaphysikgruppe (IEPPG) vor allem mit ASDEX Upgrade am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching 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 Plasmopotentials 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 Plasma-reaktoren 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

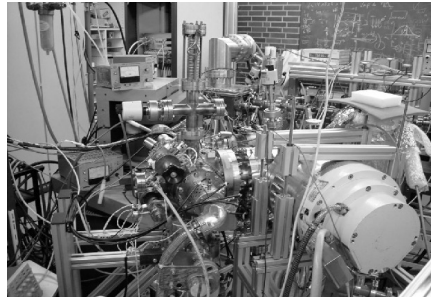
Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik

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, Masoomah 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:

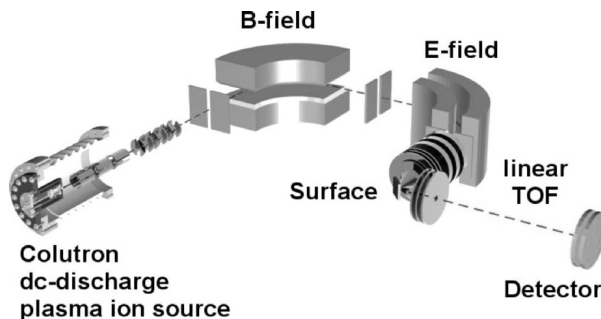
Eine der aktuellen Herausforderungen der Fusionsforschung ist die Verträglichkeit von reaktorwertigem Plasma mit plasmabegrenzenden Materialien der ersten Wand. Um die Rolle der Strahlungs- und Stoßprozesse am Plasmarand verstehen und erklären zu können, ist es notwendig, detaillierte und quantitative 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 Elektronenlagerungsquerschnitte, 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.

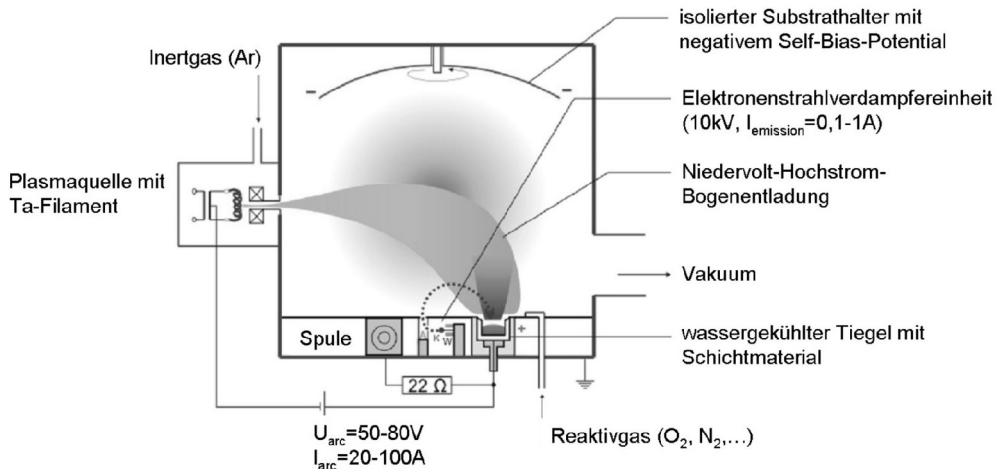


Abb.: Schematische Darstellung des RLVIP-Prozesses (Reactive Low-Voltage Ion Plating)

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 (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , HfO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , TiO_2) von höchster Güte hinsichtlich geringster optischer Verluste und hoher Umweltstabilität sowie Metall-Nitrid- und Metall-Carbid-Schichten (TiN, CrN, 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

6

Publikationen der Innsbrucker Plasmaphysiker

6.1 Publikationen der Innsbrucker Plasmaphysiker in begutachteten Fachzeitschriften seit 1958

Zusammenstellung: R. Schrittwieser, A. Kendl

1960

- F. Cap, E. Hofinger, "Über einige Klassen von stationären zweidimensionalen Lösungen der Magnetogasdynamik", *Acta Physica Austriaca* **13** (1960), 262-264.

1963

- F. Cap, R. Hommel, "Der Satz von Crocco in der Magnetogasdynamik", *Annalen der Physik*, **11** (1963), 132-137.
- F. Cap, "Potentialströmungen in der Magnetogasdynamik", *Annalen der Physik* **11** (1963), 197-200.

1965

- F. Cap, "Legendre transformation and characteristics of the magnetogasdynamic potential equation", *Journal of Nuclear Energy C* **7** (1965), 69-77.
- F. Cap, "Thermodynamics of an MHD plasma with infinite electrical conductivity", *Acta Physica Austriaca* **19** (1965), 333-338.

1966

- F. Cap, H. Friedel, "Magnetogasdynamic flow patterns", *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)* **17** (1966), 183-188.
- F. Cap, F. Herrnegger, "One-dimensional unsteady potential MHD flow", *Acta Physica Austriaca* **21** (1966), 298-304.

1967

- F. Cap, G. Müller, "On the use of variational methods in steady magneto-gas dynamics", *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)* **18** (1967), 672-682.
- H. Friedel, "Discontinuities in nonideal magnetogasdynamics." *J. Math. Phys.* **8** (1967) 2234-2236.
- H. Friedel, "Influence of finite electrical conductivity on the development of a magnetically driven shock in MGD ($\beta \ll 1$)-approximation." *Z. Angew. Math. Phys.* **18** (1967) 85-92.
- H. Friedel, K. Lackner, "Performance studies of plasma accelerators." *Problems of Propulsion and Re-entry* (1967) 261-267.
- A. Schett, A.S. Schirmaier, J.W. Weil, "Annular effect in MHD - an example of a boundary value problem to be solved by Lie series formalism." *Zeitschrift fuer Physik A* **198** (1967) 18-28.

1968

- H. Bresgen, "Two-dimensional investigations of MHD generators with consideration of the Hall effect." *Acta Phys. Austr.* **27** (1968) 248-254.
- F. Cap, D. Floriani, "Viscous MGD channel flow in boundary layer, approximation with heat conduction, *Nuclear Fusion* **8** (1968), 360-362.
- F. Cap, H. Bresgen, "Zweidimensionale Untersuchungen von MHD-Generatoren unter Berücksichtigung des Halleffektes", *Acta Physica Austriaca* **28** (1968), 65-84.
- K. Lackner, "Theoretical analysis of a coaxial Hall accelerator." *Z. Angew. Math. Phys.* **19** (1968) 844-50.

1969

- F. Cap, D. Floriani, P. Kaps, "Anwendungen von Ähnlichkeitstransformationen auf MGD-Kanalströmungen unter Berücksichtigung von Viskosität und Wärmeleitfähigkeit", *Elektrotechnik und Maschinenbau (EuM)* **86** (1969), 512-516.
- F. Cap, H. Falser, "Effects of high electrical conductivity in two-dimensional plasma flows", *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)* **20** (1969), 947-956.
- D. Floriani, "General algorithm for the investigation of plasma instabilities." *Nuclear Fusion* **9** (1969) 77-79.
- H. Friedel, "Nonideal magnetogasdynamic flows in boundary-layer approximation." *Z. Angew. Math. Phys.* **20** (1969) 329-342.
- J.W. Weil, "A note on reduced probability distribution functions" *Nuclear Fusion* **9** (1969) 171.

1970

- F. Cap, "Explosions in the ionosphere with finite electric conductivity in the presence of a uniform magnetic field, *Zeitschrift für Flugwissenschaften* **18** (1970), 98-100.
- J.W. Weil, "Classical self-correlation functions in noncollisional plasmas in a magnetic field." *Acta Phys. Pol.* **A37** (1970) 471-473.
- J.W. Weil, "Slow neutron scattering cross sections for a magnetically confined plasma with electrostatic ion oscillations." *Nuclear Fusion* **10** (1970) 193-195.

1971

- F. Cap, "Plasmatheorie der Magnetfelder am Mond", *Anzeiger der Österreichischen Akademie der Wissenschaften* **12** (1971), 170-171.
- H. Gratzl, "Growth-rates of unstable ion-sound waves in a constant electric field." *Beiträge aus der Plasmaphysik* **11** (1971) 523-526.
- H. Gratzl, "Nonlinear excitation of ion sound waves." *Acta Phys. Austr.* **34** (1971) 221-226.
- H. Gratzl, "Coordinate-independent definition of positive and negative energy waves in plasma." *Physica* **53** (1971) 498-500.

- T.D. Märk, H.J. Oskam, "Production and loss of N_2^+ , Ne^+ and Ne_2^+ during the decay of plasmas in neon- nitrogen mixtures." *Z. Phys.* **247** (1971) 84-94.
- T.D. Märk, H.J. Oskam, "Detection of NO impurity particles in plasmas produced in helium-nitrogen mixtures." *Rev. Sci. Instrum.* **42** (1971) 1372.
- T.D. Märk, H.J. Oskam, "Phosphoreszenz der Entladungsrohrwand (Kovarglas) als Beitrag zur Lichtemission abklingender Plasmen." *Z. Naturf. A* **26** (1971) 1897-1900.
- J.W. Weil, "Scattering cross section of slow neutrons in magnetically confined plasmas." *Acta Phys. Austr.* **33** (1971) 71-79.
- J.W. Weil, "Slow neutron scattering from a particle system in an electromagnetic wave. I. Basic considerations. General expression for the cross-section." *Acta Phys. Pol.* **A39** (1971) 83-86.

1972

- G. Auer, F. Cap, M. Pahl, N. Schwaighofer, W. Stemberger, "Die Innsbrucker Q-Maschine, ein Bericht aus dem Forschungsschwerpunkt Plasmaphysik", *Elektrotechnik und Maschinenbau* **89** (1972), 49-52.
- F. Cap, "Projekt zur Erzielung kontrollierter Atomkernfusion", *Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins* **63** (1972), 1067-1067.
- F. Cap, "Possible production mechanism of lunar magnetic fields", *Journal of Geophysical Research* **77** (1972), 3328-3333.
- F. Cap, "Amplitude dispersion and stability of dissipative weakly non-linear waves." *J. Mathematical Physics* **12** (1972) 1126-1130.
- F. Cap, "Langevin equation of motion for electrons in an inhomogeneous plasma", *Nuclear Fusion* **12** (1972), 125-126.
- F. Cap, "Characteristics and constants of motion method for collisional kinetic equations." *Rev. Roum. Sci. Tech. Ser. Mec. Appl.* **17** (1972) 485-490.
- H. Helm, "Experimental evidence of existence of pendel effect 1 in a low-pressure hollow cathode discharge in Argon." *Z. Naturforschung A* **27** (1972) 1812-1820.
- H. Helm, F. Howorka, M. Pahl, "Cathode fall in a cylindrical hollow cathode." *Z. Naturforsch.* **27a** (1972) 1417-1425.
- F. Herrnegger, "Effects of collisions and gyroviscosity on gravitational instability in a 2-component plasma". *Journal of Plasma Physics* **8**, (1972), 393-400.
- F. Howorka, M. Pahl, "Plasma diagnostic measurements in the negative glow of a cylindrical hollow cathode discharge." *Z. Naturforsch.* **27a** (1972) 1425-1433.
- T.D. Märk, "Stickstoffionen I: Über die Bildung von N_4^+ in Schwarmexperimenten und Gasentladungen." *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.* **9** (1972) 387-395
- T.D. Märk, W. Lindinger, F. Howorka, F. Egger, R.N. Varney, M. Pahl, "A Simple Bakeable Hollow Cathode Device for the Direct Study of Plasma Constituents." *Rev. Sci. Instrum.* **43** (1972) 1852-1853
- T.D. Märk, H.J. Oskam, "Studium von Elementarprozessen an abklingenden schwachionisierten Plasmen." *Acta Phys. Austr.* **35** (1972) 214-231

- K.W. Kratky, J.W. Weil, "Physik des flüssigen Zustands: Überlegungen zur Kirkwood-Born-Green-Gleichung." *Acta Phys. Austr.* **35** (1972) 349-364.
- M.Y. Yu, L. Stenflo, P.K. Shukla, "On the electric field of a moving test charge." *Radio Science* **17** (1972) 1151-1152.

1973

- F. Howorka, W. Lindinger, M. Pahl, "Ion sampling from the negative glow plasma in a cylindrical hollow cathode." *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.* **12** (1973) 67-77
- H. Gratzl, "Electron trapping in ion sound-waves in turbulent plasma." *Physica* **64** (1973) 608-612.
- W. Lindinger, "Reaction-rate constants in steady-state hollow-cathode discharges - Ar-H₂O reactions." *Physical Review A* **7** (1973) 328-333.
- W. Lindinger, F. Howorka, "Measurement of the neutral H₂O density in low-pressure plasmas." *Rev. Sci. Instr.* **44** (1973) 1473-1474.
- T.D. Märk, "Massenspektrometrische Untersuchungen über die neutralen Teilchen im negativen Glimmlicht einer zylindrischen Hohlkathoden-Entladung in N₂." *Z. Naturf. A* **28** (1973) 1397-1404.
- T.D. Märk, "Die Bildung von N₃⁺ in Gasentladungen." *Acta Phys. Austr.* **37** (1973) 31-37
- M. Pahl, "Mechanism and plasma diagnosis on negative glimmer of cylindrical hollow cathode discharge." *Acta Physica Austriaca* **37** (1973) 101-212.
- J.W. Weil, "Selfcorrelation functions as microcanonical averages - two examples." *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.* **33** (1973) 93-97.
- J.W. Weil, K.W. Kratky, "Aspects and applications of pair correlations in physics of multiparticle systems with particular consideration of fluid and plasma correlations (1)." *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.* **34** (1973) 129-159.
- J.W. Weil, "Aspects and applications of pair correlations in physics of multiparticle systems with particular consideration of fluid and plasma correlations (2)." *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.* **34** (1973) 161-177.

1974

- F. Cap, H. Lashinsky, "On an equation related to nonlinear saturation of convection phenomena." *Zagadnienia Drgan Nieliniowych - Nonlinear Vibration Problems* **14** (1974) 519-528.
- F. Cap, M. Leubner, "A model of the magnetopause using an angular distribution function for the incident particles", *Journal of Geophysical Research* **79** (1974), 5304-5306.
- F. Cap, "Averaging method for the solution of nonlinear differential equations with periodic nonharmonic solutions." *Int. J. Non-Linear Mechanics* **9** (1974) 441-450.
- E. Märk, "Growth rates of the ion cyclotron instability in the magnetosphere", *Journal of Geophysical Research* **79** (1974), 3218-3220.

- T.D. Märk, H. Helm, "Mass spectrometry as a technique for studying atomic properties of low-pressure plasmas: particle extraction and detection system." *Acta Phys. Austr.* **40** (1974) 158-180
- C. Oberman, G. Auer, "General theory of enhanced induced emission ion plasmas", *Physics of Fluids* **17** (1974), 1980-1982.
- P.K. Shukla, R.P. Singh, K.P. Singh, R.N. Singh, "Synchrotron radiation from drifting magnetoplasma." *Int. Journal of Electronics* **36** (1974) 393-398.
- H. Sugai, E. Märk, "Plasma density measurements by electron-plasma wave pulses in a Q-machine", *Journal of Physics D: Applied Physics* **7** (1974), 2198-2204.
- J.W. Weil, "Superposition of fluctuations of different time-constants - a contribution." *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.* **37** (1974) 165-170.

1975

- F. Cap, "Physical instabilities and their stabilization." *Acta Physica Austriaca* **41** (1975) 229-236.
- R.V. Deutsch, "A possibility for providing uniform current patterns in steady-state MHD generators using electrode with variable conductivity", *Plasma Physics* **17** (1975), 225-236.
- G. Popa, N. Sato, E. Märk, R. Schrittwieser, E. Mravlag, "Ion space charge instability induced by a grid in a Q-machine plasma", *Physics Letters A* **53** (1975), 427-428.
- H. Sugai, E. Märk, "Observation of nonlinear phase shift of electron plasma waves" *Physical Review Letters* **34** (1975), 127-130.
- J.W. Weil, "Nonlinear plasma theory - Ohm's law (3rd degree) in field strengths and nonlinear amplitude equations - 4-wave interaction." *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.* **39** (1975) 155-165.

1976

- G. Popa, N. Sato, E. Märk, R. Schrittwieser, E. Mravlag, "Influence of a negatively biased grid on the plasma in a single-ended Q-machine", *Journal of Physics D: Applied Physics* **9** (1976), 397-405.
- N. Sato, E. Märk, G. Popa, "Non-linear mixing of dispersive waves", *Plasma Physics* **18** (1976), 897-904.
- N. Sato, G. Popa, E. Märk, E. Mravlag, R. Schrittwieser, "Instability as a source for traveling ion waves", *Physics of Fluids* **19** (1976), 70-73.
- N. Sato, G. Popa, E. Märk, R. Schrittwieser, E. Mravlag, "Test-wave propagation in the presence of a large-amplitude electron plasma wave", *Physical Review Letters* **37** (1976), 1684-1687.
- H. Störi, T.D. Märk, M. Langenwalter, M. Pahl, "Fast driver stage in a high-voltage discharge pulser." *Journal of Physics E* **9** (1976) 917-918.
- J.W. Weil, "Plasma heating due to nonlinear interaction in two special 4-plasma-wave systems" *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.* **41** (1976) 245-247.

1977

- F. Cap, "Plasma-Energiequelle der Zukunft", *Das Kernkraftwerk* **19** (1977), 1-5, Beilage zur Österreichischen Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft (OZE).
- E. Märk, N. Sato, "Higher harmonics of electron plasma waves", *Journal of Plasma Physics* **17** (1977), 357-368.
- J.J. Rasmussen, D. Sandu, R. Schrittwieser, "Ion-acoustic instability in the presence of high frequency oscillations", *Plasma Physics* **19** (1977), 1139-1144.

1978

- F. Cap, "Some remarks on toroidal problems", *Beiträge aus der Plasmaphysik* **18** (1978), 207-216.
- F. Cap, "Energiegewinnung aus Kernfusion und die Energieprobleme der Menschheit", *Universitas* **33** (1978), 299-302.
- F. Cap, "Travelling large amplitude electron-ion plasma waves", *Beiträge aus der Plasmaphysik* **18** (1978), 217-223.
- F. Cap, R. Deutsch, "Toroidal resonators for electromagnetic waves", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **MTT-26** (1978), 478-486.
- F. Cap, M. Leubner, "Rutherford-Streuung im homogenen Magnetfeld", *Acta Physica Austriaca* **49** (1978), 11-19.
- J.W. Edenstrasser, "Stability criterion for symmetric MHD equilibria by minimizing potential energy." *Journal of Plasma Physics* **20** (1978) 503-520.
- H. Helm, "The transmission of a sampling orifice for charged and excited particles in the molecular flow range." *Beiträge aus der Plasmaphysik* **18** (1978) 147-153.
- F. Howorka, "Reactions of singly and doubly charged Argon ions with N₂ and O₂ in a steady-state hollow-cathode discharge." *J. Chem. Physics* **68** (1978) 804-811.
- I. Kuen, F. Howorka, R.N. Varney, "Cylindrical hollow-cathode as a source of negative ions." *Int. J. Mass Spectrometry and Ion Processes* **28** (1978) 101-106.
- C. Leubner, F. Ehlötzky, "Intensity-dependent frequency-shift in Thomson scattering from a thermal plasma." *Journal of Physics A* **11** (1978) 759-765.
- M.P. Leubner, "Influence of non-Maxwellian distribution functions of solar wind protons on the ion-cyclotron instability", *Journal of Geophysical Research* **84** (1978), 3900-3902.
- E. Märk, R. Hatakeyama, N. Sato, "Electron plasma waves in a plasma with non-Maxwellian distribution produced by a large-amplitude waves", *Plasma Physics* **20** (1978), 415-425.
- E. Märk, R. Itatani, "Wavenumber oscillations of a linear electron plasma testwave in the presence of a standing large-amplitude waves", *Physics Letters A* **65** (1978), 314-316.
- T.D. Märk, "Production of H₂ in a water vapor plasma of a hollow cathode glow discharge." *Acta Phys. Austr.* **49** (1978) 67-70.
- R. Ramberger, "Optimization of current profile in MHD generators." *Amer. Inst. Aeronaut. Astronaut. Journal* **16** (1978) 740-746.

- R. Schrittwieser, "Electron current driven ion acoustic standing wave instability", *Physics Letters A* **65** (1978), 235-238.
- H. Störi, T.D. Märk, R.N. Varney, M. Pahl, "Some investigations of the ignition and development of breakdown in cylindrical hollowcathode discharges." *Beiträge aus der Plasmaphysik* **18** (1978) 79-100.

1979

- G. Auer, "Amplitude dispersion of standing electron plasma waves", *Plasma Physics* **21** (1979), 895-900.
- G. Auer, "Magnetohydrodynamische Stromerzeugung", *Österreichische Zeitschrift fuer Elektrizitätswirtschaft* **32** (1979), 307-313.
- G. Auer, K. Sauer, K. Baumgärtel, "Second harmonic emission at resonance absorption", *Physical Review Letters* **42** (1979), 1744-1746.
- M.T.C. Fang, S. Kuhn, "Linear instability of a collisionless single-ended Q-machine." *Journal de Physique* **40** (1979) 579-580.
- R. Hatakeyama, M. Oertl, E. Märk, "Current-driven collisionless drift instability", *Physics Letters A* **74** (1979), 215-218.
- H. Helm, "Experimental measurements on the current balance at the cathode of a cylindrical hollow cathode glow discharge." *Beiträge aus der Plasmaphysik* **19** (1979) 233-257.
- S. Kuhn, "Determination of axial steady-state potential distributions in collisionless single-ended Q-machines", *Plasma Physics* **21** (1979), 613-626.
- C. Leubner, "Spectrum of curvature radiation from laser heated dense plasmas." *Phys. Fluids* **22** (1979) 444-448.
- M.P. Leubner, "Velocity distribution functions and cyclotron wave growth in a modified bi-Maxwellian two ion component solar plasma", *Journal of Geophysical Research* **84** (1979), 2661-2665.
- P. Michelsen, H. Pécseli, J.J. Rasmussen, R. Schrittwieser, "The current driven ion-acoustic instability in a collisionless plasma", *Plasma Physics* **21** (1979), 61-73.
- K. Sauer, K. Baumgärtel, G. Auer, "Model calculations of non-stationary resonant reflectivity of plasmas", *Physics Letters* **74A** (1979), 211-214.
- K. Schöpf, A. Harms, "The synergetics of the catalytic D-D fusion-fission breeder, *Nuclear Fusion* **19** (1979), 5-19.
- K. Schöpf, A. Harms, "Characteristics of a beam driven deuterium-fueled fusion-fission reactor system, *Nuclear Science and Engineering* **71** (1979), 170-181.
- K. Schöpf, "Die Bedeutung von Fusions-Fissions-Hybriden in einer expandierenden Atomwirtschaft", *Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft* **32** (1979), H 3, *Das Kernkraftwerk* **20** (1979), Nr. 1, 1-8.
- R. Schrittwieser, E. Märk, S. Kuhn, "Grid versus plate excitation of the electron current driven ion wave instability." *Journal de Physique* **40** (1979) 581-582.
- F.P. Stössel, "Toroidal Trivelpiece-Gould modes." *Plasma Physics* **21** (1979) 1031-1042.

- F.P. Stössel, "Electrostatic Trivelpiece-Gould modes in a torus." *Journal de Physique* **40** (1979) 603-604.

1980

- G. Auer, "Energiegewinnung aus Kernfusion, A: allgemeiner Teil", *Das Kernkraftwerk* **21** (1980), 1-7 (*Öst. Zeitschrift f. Elektrizitätswirtschaft* **33** (1980)).
- G. Auer, "Energiegewinnung aus Kernfusion, B: spezieller Teil", *Das Kernkraftwerk* **21** (1980), 11-19 (*Österreichische Zeitschrift fuer Elektrizitätswirtschaft* **33** (1980)).
- G. Auer, F. Cap, "Gewinnung von Fusionsenergie mittels Laser", *Das Kernkraftwerk* **21** (1980), 33-36 (*Öst. Zeitschrift f. Elektrizitätswirtschaft* **33** (1980)).
- F. Cap, R. Deutsch, "Toroidal Resonators for electromagnetic waves II", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **MTT-28** (1980), 700-703.
- F. Cap, G. Auer, "Gewinnung von Fusionsenergie mittels Laser", *Das Kernkraftwerk* **21** (1980) 33-336, in OZE (Öst. Zeitschrift f. Elektrizitätswirtschaft).
- R. Deutsch, "The spectrum of stationary electromagnetic oscillations in toroidal systems containing plasma." *Plasma Phys. Contr. Fusion* **22** (1980), 401-419.
- J.W. Edenstrasser, "Unified treatment of symmetric MHD equilibria", *Journal of Plasma Physics* **24** (1980), 299-313.
- J.W. Edenstrasser, "The only three classes of symmetric MHD equilibria", *Journal of Plasma Physics* **24** (1980), 515-518.
- R. Hatakeyama, M. Oertl, E. Märk, "Ion heating due to collisionless drift-wave turbulence", *Journal of the Physical Society of Japan*. **49** (1980), 845-846.
- R. Hatakeyama, M. Oertl, E. Märk, R. Schrittwieser, "Collisionless drift instability and ion heating in a current-carrying inhomogeneous plasma", *Physics of Fluids* **23** (1980), 1774-1781.
- H. Helm, T.D. Märk, W. Lindinger; "Plasma sampling - a versatile tool in plasma chemistry." *Pure Appl. Chem.* **52** (1980) 1739-1757
- F. Howorka, A. Scherleitner, V. Gieseke, I. Kuen, "Bakeable hollow-cathode for the study of ion-molecule reactions in discharges in gaseous-mixtures." *Int. J. Mass Spectrometry and Ion Proc.* **32** (1980) 321-331.
- S. Kuhn, "Integral approach of successive collisions to linear charged-particle transport through a slab", *Physical Review A* **22** (1980), 2460-2467.
- M. Oertl, H. Störi, R. Hatakeyama, "A small electrostatic retarding field energy analyzer with compensating differentiation circuit", *Journal of Applied Physics* **51** (1980), 1431-1434.
- G. Popa, R. Schrittwieser, "Ion-acoustic instability driven by an electron flux towards the hot plate in a single-ended Q-machine", *Physics Letters A* **75** (1980), 285-287.
- G. Popa, R. Schrittwieser, E. Märk, "Stabilization of the ion acoustic instability by an ion beam in a single-ended Q-machine", *Physics Letters A* **75** (1980), 288-292.
- K. Schöpf, "Beam driven D-fusion plasma within a fusion-fission hybrid system", *Atomkernergie/Kerntechnik* **36** (1980), 26-29.

1981

- N.E. Andreev, G. Auer, K. Baumgärtel, K. Sauer, "Temperature effects on harmonic generation in laser-irradiated plasmas", *Physics of Fluids* **24** (1981), 1492-1498.
- G. Auer, "Fusion durch Teilchenstrahlen", *Das Kernkraftwerk* **22** (1981), 1-4 (*Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft* **34** (1980)).
- F. Cap, "Toroidal resonators and waveguides of arbitrary cross section", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **MTT-29** (1981), 1053-1059.
- M. Grössl, M. Langenwalter, H. Helm, T.D. Märk, "Molecular ion formation in decaying plasmas produced in pure argon and krypton." *J. Chem. Phys.* **74** (1981) 1728-1735
- S. Iizuka, P. Michelsen, J.J. Rasmussen, R. Schrittwieser, R. Hatakeyama, K. Saeki, N. Sato, "A method for measuring fast time evolutions of the plasma potential by means of a simple emissive probe", *Journal of Physics E: Scientific Instruments* **14** (1981), 1291-1295.
- S. Kuhn, A.D.R. Phelps, M.T.C. Fang, "Low-frequency longitudinal instability in collisionless single-ended Q-machines", *Physics of Fluids* **24** (1981), 1586-1587.
- S. Kuhn, "Axial equilibria, disruptive effects, and Buneman instability in collisionless single-ended Q-machines", *Plasma Physics* **23** (1981), 881-902.
- M.P. Leubner, "Temperature anisotropy instabilities driven by Whang's ion model", *Journal of Geophysical Research* **86** (1981), 7787-7791.
- W. Lindinger, F. Howorka, P. Lukac, S. Kuhn, H. Villinger, E. Alge, H. Ramler, "Charge transfer of $\text{Ar}^{++}\text{N}_2 - \text{N}_2^{++}\text{Ar}$ at near thermal energies", *Physical Review A* **23** (1981), 2319-2326.
- D. Lortz, W. Lotz, J. Nührenberg, F. Cap, "Three-dimensional analytical force-free MHD equilibria", *Zeitschrift fuer Naturforschung* **36** (1981), 144-149.
- K. Schöpf, A. Harms, "Break-even constraints in beam driven D-fusion hybrids, *Transaction of the American Nuclear Society* **38** (1981), 235-236.
- K. Schöpf, A. Harms, "Fusion-hybrid supported satellite reactors, *Transaction of the American Nuclear Society* **38** (1981), 537-538.
- K. Schöpf, A. Harms, "The energetics of beam driven D-cycle plasmas", *Journal of Nuclear Science and Technology* **18** (1981), 653-672.

1982

- F. Cap, J. Zagrodzinski, "Perturbational approach to force-free toroidal equilibria", *Beiträge aus der Plasmaphysik* **22** (1982), 7-14.
- S. Iizuka, P. Michelsen, J.J. Rasmussen, R. Schrittwieser, R. Hatakeyama, K. Saeki, N. Sato, "Dynamics of a potential barrier formed on the tail of a moving double layer in a collisionless plasma", *Physical Review Letters* **48** (1982), 145-148.
- M.P. Leubner, "On Jupiter's whistler emission", *Journal of Geophysical Research* **87** (1982), 6335-6338.
- T.D. Märk, "Mass spectrometric determination of partial ionization cross sections." *Beiträge aus der Plasmaphysik* **22** (1982) 257-294.

- O. Petruş, G. Popa, S. Kuhn, "Experiment planning, mathematical modelling, and nonlinear optimization of the ion-nitriding process in a glow discharge plasma", *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **2** (1982), 167-183.
- G. Popa, M. Sanduloviciu, S. Kuhn, M. Oertl, R. Schrittwieser, "About localization and suppression of the so-called ion-acoustic instability in a low density single-ended Q-machine", *Physics Letters A* **87** (1982), 175-178.
- K. Schöpf, M. Heindler, A. Harms, "Comparative analysis of integrated and non-integrated fusion and fission energy systems", *Nuclear Science and Engineering* **80** (1982), 700-710.
- K. Schöpf, G. Pantis, A. Harms, "Reaction balance and efficiency analysis of a hybrid fusion breeder with depending D-He-3 reactors", *Journal of Fusion Energy* **2** (1982), 181-196.
- R. Schrittwieser, J.J. Rasmussen, "Highly supersonic ion pulses in a collisionless magnetized plasma", *Physics of Fluids* **25** (1982), 48-51.

1983

- F. Cap, "Two-dimensional toroidal MHD equilibria of arbitrary cross-section", *Journal of Plasma Physics* **29** (1983), 173-175.
- J.W. Edenstrasser, G.F. Nalesso, W. Schuurman, "Finite-beta minimum energy equilibria of RFPs, screw pinches and tokamaks", *Nuclear Instruments & Methods* **207** (1983), 75-85.
- J.W. Edenstrasser, W. Schuurman, "Axisymmetric finite- β minimum energy equilibria of weakly toroidal discharges", *Physics of Fluids* **26** (1983), 500-507.
- A. Harms, S. Lie, K. Schöpf, "Sustainable branching processes of deuterium-based fusion", *Nuclear Technology/Fusion* **3** (1983), 186-194.
- R. Keil, "Numerical calculation of Trivelpiece-Gould modes in a torus with circular cross-section." *Plasma Phys.* **25** (1983) 841-854.
- S. Kuhn, "Comment on 'Dynamics of a potential barrier formed on the tail of a moving double layer in a collisionless plasma'", *Physical Review Letters* **50** (1983), 217-218.
- M.P. Leubner, "High energy tail distributions and resonant wave particle interaction", *Journal of Geophysical Research* **88** (1983), 469-473.
- G. Popa, M Oertl", "Reflection of an ion-acoustic soliton by a bipolar potential wall structure", *Physics Letters A* **98** (1983), 110-112.
- A.S. Sakharov, S. Kuhn, "Quasilinear theory of current-driven ion-acoustic turbulence in a collisional magnetized plasma", *Physics of Fluids* **26** (1983), 3482-3487.
- N. Sato, R. Hatakeyama, S. Iizuka, T. Mieno, K. Saeki, J.J. Rasmussen, P. Michelsen, R. Schrittwieser, "Stationary double layers in a collisionless magnetoplasma", *Journal of the Physical Society of Japan* **52** (1983), 875-884.
- H.R. Skullerud, S. Kuhn, "On the calculation of ion and electron swarm properties by path integral methods." *Journal of Physics D* **16** (1983) 1225-1234.

- R. Schrittwieser, "Modulation of the current-driven ion cyclotron instability by the potential relaxation instability", *Physics of Fluids* **26** (1983), 2250-2255.
- R. Schrittwieser, "Coherence and threshold of current-driven potential relaxation instability", *Physics Letters A* **95** (1983), 162-164.
- H.R. Skullerud, S. Kuhn, "On the calculation of ion and electron swarm properties by path integral methods", *J. Physics D: Appl. Physics* **16** (1983), 1225-1234.
- K. Stephan, T.D. Märk, E. Märk, A. Stamatovic, N. Djuric, A.W. Castleman jr., "Metastable decomposition of Ar³⁺ cluster ions into Ar²⁺ and Ar⁺". *Beiträge aus der Plasmaphysik* **23** (1983) 369-327.

1984

- F. Cap, "Axisymmetric toroidal MHD equilibria of arbitrary cross section as an eigenvalue problem", *Soviet Fizika Plasmy* **10** (1984), 435-436 (*Sov. Journal of Plasma Physics* **10** (1984), 255-255).
- F. Cap, S. Bulanov, "On the problem of relativistic particles acceleration in processes similar to those in solar flares", *Adv. in Space Research* **4** (1984), 149-152.
- F. Cap, "Electromagnetic waves in toroidal vessels of arbitrary cross section filled with radially inhomogeneous dielectric medium", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **MTT-32** (1984), 1336-1341.
- J.W. Edenstrasser, W. Schuurman, "On a minimum energy principle for nonideal MHD equilibria", *Comments on Plasma Physics and Controlled Fusion* **8** (1984), 255-268.
- F. Handle, W. Lindinger, F. Howorka, M. Pahl, "Density of fast electrons on the axis of a cylindrical hollow cathode discharge." *Beiträge aus der Plasmaphysik*. **24** (1984) 407-416.
- S. Kuhn, "Linear longitudinal oscillations in collisionless plasma diodes with thin sheaths, part I: method", *Physics of Fluids* **27** (1984), 1821-1833.
- S. Kuhn, "Linear longitudinal oscillations in collisionless plasma diodes with thin sheaths, part II: application to an extended Pierce-type problem", *Physics of Fluids* **27** (1984), 1834-1851.
- M.P. Leubner, "A model of the magnetopause using an angular distribution for the incident particles: a correction", *Journal of Geophys. Res.* **89** (1984), 1027-1082.
- T.D. Märk, "Frequency-distribution of simple and double positively charged molecular ions of selected chemical elements in a spark plasma." *Int. J. Mass Spectrometry and Ion Processes* **55** (1984) 325-327.
- M. Sanduloviciu, G. Popa, M. Oertl, "A new possibility of suppression of ion-acoustic standing waves excited in a single ended Q-machine." *Plasm Phys. Control. Fusion* **26** (1984) 471-475.
- K. Schöpf, "Time dependent performance characteristics of fusion-fission hybrid blankets", *Atomkernenergie/Kerntechnik* **44** (1984), 73-80.
- K. Schöpf, A. Harms, "The integration of D-cycle tokamaks with decentralized small fusion and fission reactors", *Atomkernenergie/Kerntechnik* **44** (1984), 46-52.

- R. Schrittwieser, N. Rynn, R. Koslover, R. Karim, "Can the electrostatic ion-cyclotron instability be driven by a two-dimensional sheath?", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **26** (1984), 1591-1595.
- R. Schrittwieser, N. Rynn, R. Koslover, R. Karim, "Electrostatic ion-cyclotron instability driven by a slow electron drift", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **26** (1984), 1597-1604.

1985

- I. Bialynicki-Birula, Z. Bialynicki-Birula, "Solutions of Vlasov-Maxwell equations for a magnetically confined relativistic cold plasma." *Physica A* **133** (1985) 228-246.
- F. Cap, "Electromagnetic eigenfrequency of anisotropic inhomogeneous axisymmetric toroidal plasmas of arbitrary meridional cross section", *Phys. Fluids* **28** (1985), 1766-1771.
- T.L. Crystal, S. Kuhn, "Particle simulations of the low-alpha Pierce diode", *Physics of Fluids* **28** (1985), 2116-2124.
- M. Hörhager, C. Leubner, "Synchro-Compton radiation from charges driven by circularly polarized large-amplitude plasma-waves." *Astrophysical Journal* **296** (1985) 115-120.
- S. Iizuka, P. Michelsen, J.J. Rasmussen, R. Schrittwieser, R. Hatakeyama, K. Saeki, N. Sato, "Double layer dynamics in a collisionless magnetoplasma", *Journal of the Physical Society of Japan* **54** (1985), 2516-2529.
- M.P. Leubner, K. Zollner, "The quadrupole magnetopause", *Journal of Geophysical Research* **90** (1985), 8265-8268.
- W. Lindinger; Basic ion reactions and kinetics in plasmas. *Pure & Appl. Chem.* **57** (1985) 1223-1234
- G. Popa, R. Schrittwieser, J.J. Rasmussen, P. Krumm, "The electrostatic ion-cyclotron instability-a two-dimensional potential relaxation instability", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **27** (1985), 1063-1067.
- R. Schrittwieser, R. Koslover, R. Karim, N. Rynn, "A new plasma source based on contact ionization", *Journal of Applied Physics* **58** (1985), 598-600.
- R. Schrittwieser, J.J. Rasmussen, "A comment on 'Interaction of lower hybrid waves with the current-driven ion-acoustic instability'", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **27** (1985), 789-791.
- N.S. Wolf, R. Schrittwieser, "Determination of the frequency-controlling region of the current-driven electrostatic ion-cyclotron instability", *Physics Letters A* **109** (1985), 160-162.

1986

- F. Cap, "Electromagnetic eigenfrequency of anisotropic inhomogeneous axisymmetric toroidal plasmas of arbitrary meridional cross section", *Computer Physics Communications* **40** (1986), 99-103.

- S. Kuhn, M. Hörhager, "External-circuit effects on Pierce-diode stability behavior", *Journal of Applied Physics* **60** (1986), 1952-1959.
- M.P. Leubner, A.F. Viñas, "Stability analysis of double-peaked proton distribution functions in the solar wind", *Journal of Geophys. Research* **91** (1986), 13366-13372.
- O. Petruș, S. Kuhn, Gh. Dinescu, "Simulation of ultrafast switching of infrared radiation by laser-produced semiconductor plasma", *Canadian Journal of Physics* **64** (1986), 857-864.
- J.J. Rasmussen, R. Schrittwieser, Å. Skøelv, "The electrostatic ion-cyclotron instability excited by a current to a strip collector", *Phys Scripta* **34** (1986), 821-824.

1987

- V.I. Berezhiani, D.D. Tskhakaya, G. Auer, "Some remarks on spontaneous magnetic field generation and the nonlinear dynamics of a Langmuir plasma", *Journal of Plasma Physics* **38** (1987), 139-153.
- F. Cap, "Toroidal boundary-problems in plasma physics." *Zeitschrift für Angew. Mathematik und Mechanik* **67** (1987) 58-60.
- G. Popa, M. Sanduloviciu, E. Lozneau, R. Schrittwieser, "Electrostatic ion-cyclotron instability and potential relaxation instability excited by a ring-button electrode", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **29** (1987), 271-277.

1988

- S.V. Bulanov, F. Cap, "Uskorenye saryashennykh chastits vylisi nulevykh toчек magnitogo polya (Acceleration of charged particles near zero points of magnetic field)", *Astronom. Zhurn.* **65** (1988), 837-851.
- C. Leubner, M.P. Leubner, "Elementary theory of the dayside magnetopause for finite shock layer thickness", *Annales Geophysicae* **6** (1988), 297-304.
- Y. Murusidze, D.D. Tskhakaya sr., S. Kuhn, M. Hörhager, "Radiation of ion-sound waves from a pulsating Langmuir soliton", *Physical Review A* **38** (1988), 1427-1432.
- M. Oertl, G. Popa, "Single and multiple reflection of ion acoustic waves and solitons from a bipolar wall." *Plasma Phys. Control. Fusion* **30** (1988) 529-536.

1989

- F. Cap, "Kalte Fusion", *Öst. Zeitschr. f. Elektrizitätswirtschaft* **42** (1989), A93-A94.
- F. Cap, "Plasmaelektrische Sonderabfallbeseitigung" *Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft* **42** (1989), A18-A19.
- F. Cap, S. Khalil, "Eigenvalues of relaxed axisymmetric toroidal plasmas of arbitrary aspect ratio and arbitrary cross section", *Nuclear Fusion* **29** (1989), 116-117.
- F. Cap, N. Schupfer, "Axisymmetric MHD Modes in an homogeneous toroidal plasma of arbitrary meridional cross section and arbitrary aspect ratio", *Nuclear Fusion* **29** (1989), 1469-1478.
- F. Cap, N. Schupfer, "Threedimensional electromagnetic modes in magnetized toroidal plasmas", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **31** (1989), 11-19.

- H.L. Pécseli, J.J. Rasmussen, R.W. Schrittwieser, "An experimental investigation on the influence of neutral collisions on the current-driven electrostatic ion-cyclotron instability", *Physica Scripta* **39** (1989), 480-484.
- G. Popa, E. Mravlag, R.W. Schrittwieser, "On the mechanism of the electrostatic ion-cyclotron instability", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **31** (1989), 1863-1877.

1990

- F. Cap, "Energie aus Kernfusion", *Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft* **43** (1990), 1-15.
- M. Hörhager, S. Kuhn, "Weakly nonlinear steady-state oscillations in the Pierce Diode", *Physics of Fluids B* **2** (1990), 2741-2763.
- S. Iizuka, R. Schrittwieser, "Quenching and amplification of the potential relaxation instability by control of the radial electric field", *Phys. Lett. A* **149** (1990), 393-397.
- D. Magreiter, H. Deutsch, T.D. Märk, "Absolute electron impact cross sections for single ionization of metastable atoms of H, He, Ne, Ar, Kr, Xe and Rn." *Contrib. Plasma Phys.* **30** (1990) 487-495.
- E. Mravlag, P. Krumm, "Space potential measurements with a continuously emitting probe", *Review of Scientific Instruments* **61** (1990), 2164-2170.
- P. Scheier, T.D. Märk, "Unimolecular decay of metastable cluster anions." *Contrib. Plasma Phys.* **30** (1990) 749-753.

1991

- R. Armstrong, R. Schrittwieser, "Ion beam driven low frequency instability at a probe in a double-plasma device", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **33** (1991), 1407-1422.
- E. Benova, I. Zhelyazkov, P. Staikov, and F. Cap, "Modeling of a plasma column produced and sustained by a traveling electromagnetic wave in the presence of a constant axial magnetic field", *Physical Review A* **44** (1991) 2625-2640.
- F. Cap, "Neuer Fortschritt auf dem Gebiet der Fusionsenergie", *Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft* **44** (1991), A73-A74.
- F. Cap, "Geschichte der Plasmaphysik in Innsbruck", *Österreichische Hochschulzeitung* **2** (1991), 20-21.
- F. Cap, R. Dum, "Ein Kollokationsverfahren zur Lösung elektrostatischer und elektromagnetischer Probleme", *Elektrotechnik und Informationstechnik (EuM)*, **108** (1991), 121-123.
- T.L. Crystal, P.C. Gray, W.S. Lawson, C.K. Birdsall, S. Kuhn, "Trapped-electron effects on time-independent negative-bias states of a collisionless single-emitter plasma device: theory and simulation", *Physics of Fluids B* **3** (1991), 244-254.
- J.J. Rasmussen, R.W. Schrittwieser, "On the current-driven electrostatic ion-cyclotron instability", *IEEE Transactions on Plasma Science* **19** (1991), 457-501.
- K. Schöpf, A. Harms, "Particle and energy chaining in nuclear reactions", *Fusion Technology* **20** (1991), 1059-1064.

1992

- S.V. Bulanov, S. Kuhn, A.S. Sakharov, "Particle simulations of boundary-condition and hf-field effects on strong double layers in a collisionless bounded plasma", *Physics of Fluids B* **4** (1992), 2871-2884.
- F. Cap, "Die Sicherheit von Fusionskraftwerken", *Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft* **45** (1992), A13-A14.
- F. Cap, "Beseitigung von Sonderabfällen durch elektrische Energie mittels des Plasmoxverfahrens", *Öst. Z. für Elektrizitätswirtschaft* **45** (1992), A 245-245.
- F. Cap, "Neue Art der Fusionsenergiegewinnung", *Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft* **45** (1992), A 232-233.
- T.D. Märk, "Ionization by electron impact", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **34** (1992) 2083-2090.
- R.W. Schrittwieser, T. Carpenter, I. Axnäs, S. Torvén, "Observation of double layers in a convergent magnetic field", *IEEE Trans. Plasma Science* **20** (1992), 607-613.
- D. Smith, "Cold fusion: formation of molecules in in interstellar plasmas." *Plasma Phys. Control. Fusion* **34** (1992) 1817-1824.

1993

- F. Aumayr, T.D. Märk, HP. Winter; The statistics of electron emission from clean metal surfaces induced by slow ions: measurement and recent applications. *Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc.* **129** (1993) 17-29
- A.S. Deassis, M. Tavares, "Field-aligned current generation from MHD waves in the terrestrial magnetosphere." *Planetary and Space Science* **41** (1993) 57-63.
- S. Iizuka, R. Schrittwieser, "Effects of a radial electric field on low frequency instabilities in a magnetized plasma", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **35** (1993), 77-91.
- R.W. Schrittwieser, "The influence of electron-ion collisions on a low-frequency plasma instability", *International Journal for Mass Spectrometry and Ion Processes* **129** (1993), 205-213.

1994

- O.K. Cheremnykh, Zh.M. Andrushchenko, J.W. Edenstrasser, V.B. Taranov, "Relaxation of a nonideal magnetohydrodynamic plasma in a cylindrical column", *Physics of Plasmas* **1** (1994), 2525-2530.
- A. Ganguli, S. Kuhn, "Collision integral for ionization by electron impact for nonisotropic electron distribution functions", *Phys. Review A* **49** (1994), 3610-3619.
- T. Gyergyek, M. Cercek, M. Stanojevic, N. Jelic, "An investigation of the electrode current oscillations caused by the potential relaxation instability in a weakly magnetized plasma", *Journal of Physics D* **27** (1994) 2080-2094.
- T. Hladschik, K. Schöpf, "TF-ripple loss reduced alpha heating", *Fusion Technology* **26** (1994), 588-592.
- N. Jelic, M. Cercek, M. Stanojevic, T. Gyergyek, "Conditions for the existence of strong double layers." *Journal of Plasma Physics* **51** (1994) 233-260.

- N. Jelic, M. Cercek, M. Stanojevic, T. Gyergyek, "An investigation of the collisionless discharge in the presence of an electron beam." *Journal of Physics D* **27** (1994) 2487-2498.
- S. Kuhn, "The physics of bounded plasma systems (BPS's): Simulation and interpretation", *Contributions to Plasma Physics* **34** (1994), 495-538.
- T. Mieno, M. Oertl, R. Hatakeyama, N. Sato, "Electron cyclotron emission from double layers in magnetized collisionless plasmas", *Physics Letters A* **184** (1994) 445-449.
- H. Pedit, S. Kuhn, "Kinetic modeling of a two-dimensional, collisionless bounded plasma", *Physics of Plasmas* **1** (1994), 13-31.
- G. Popa, R. Schrittwieser, "Resonant coupling between ion-bouncing in a potential well and the potential relaxation instability", *Physics of Plasmas* **1** (1994), 32-42.
- M. Stanojevic, M. Cercek, T. Gyergyek, N. Jelic, "Interpretation of a planar Langmuir probe current-voltage characteristic in a strong magnetic field", *Contributions to Plasma Physics* **34** (1994) 607-633.
- D. Trunec, P. Spanel, D. Smith; Electron-Temperature Relaxation in Afterglow Plasmas - Diffusion Cooling. *Contrib. Plasma Phys.* **34** (1994) 69-79

1995

- H. Deutsch, K. Becker, T.D. Märk, "Calculated cross sections for double and triple ionization of atoms by electron impact", *Contrib. Plasm. Phys.* **35** (1995) 421-431.
- B. Dünser, M. Lezius, P. Scheier, H. Deutsch, T.D. Märk, "Electron impact ionization of C₆₀", *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 3364-3367.
- J.W. Edenstrasser, "The plasma transport equations derived by multiple time-scale expansions and turbulent transport. I. General theory", *Physics of Plasmas* **2** (1995), 1192-1205.
- J.W. Edenstrasser, M.M.M. Kassab, "The plasma transport equations derived by multiple time-scale expansions. II. An application", *Physics of Plasmas* **2** (1995), 1206-1216.
- T. D. Märk, „Electron impact ionization of plasma edge atoms“. In: R. K. Janev: *Atomic and Molecular Processes in Fusion Edge Plasmas*. Plenum Press, New York 1995, p. 59-89.
- H. Rieser, H. Werthmann, S. Kuhn, "Neoclassical transport analysis for a class of high- β tokamak equilibria", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **37**(1995), 191-208.
- K. Schöpf, B. Heuschneider, T. Hladschik, "Nonlinear fusion dynamics in D-T tokamak plasmas, *Kerntechnik* **60** (1995), 179-183.
- P. Spanel, "An on-line Langmuir probe technique for the study of afterglow plasmas." *Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc.* **149/150** (1995) 299-310
- P. Spanel, D. Smith, "Recent studies of electron attachment and electron-ion recombination at thermal energies". *Plasma Sources Sci. Technol.* **4** (1995), 302-306.

- P. Spanel, D. Smith, O. Chudacek, P. Kudrna, M. Tichy, "The Influence of Collisions in the Space-Charge Sheath on the Ion Current Collected by a Langmuir Probe." *Contrib. Plasma Phys.* **35** (1995) 3-14.
- D. Trunec, P. Spanel, D. Smith, "The Influence of Ion-Neutral Collisions in the Plasma Sheath on the Ion Current to an Electrostatic-Probe - Monte-Carlo Simulation." *Contrib. Plasma Phys.* **35** (1995) 203-212.
- M. Zimmerling, R. Schrittwieser, "The influence of a biased limiter on a collisionless magnetised alkali plasma column", *Phys. Lett. A* **205** (1995), 189-198.

1996

- A.S. de Assis, M.P. Leubner, C.A. de Azevedo, "Electron acceleration due to Cherenkov damping of Alfvén waves", *Physica Scripta* **T63** (1996), 244-247.
- J.W. Edenstrasser, M.M.M. Kassab, "On the validity of ideal MHD equations for different collisional regimes", *Physica Scripta* **53** (1996), 714-719.
- J.W. Edenstrasser, M.M.M. Kassab, "Transport equations on different time scales for intermediately and strongly collisional regimes", *Journal of Plasma Physics* **56** (1996), 45-65.
- M. Oertl, S. Kuhn, P. Krumm, N. Schupfer, T.L. Crystal, "Influence of trapped electrons on the time-independent states of a negatively biased single-ended Q-machine", *Physics of Plasmas* **3** (1996), 1192-1201.
- A. Piel, H. Klostermann, A. Rohde, N. Jelić, R. Schrittwieser, "Ion sheath oscillations in DP-machines", *Physics Letters A* **216** (1996), 296-302.
- G. Popa, R. Schrittwieser, "The effect of the collector sheath on the potential relaxation instability", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **38** (1996), 2155-2162.
- K. Schöpf, T. Hladschik, "Dynamic ignition - a new operation criterion for fusion plasmas", *Annals of Nuclear Energy* **23** (1996), 59-64.
- A. Siebenförcher, R. Schrittwieser, "A new simple emissive probe", *Review of Scientific Instruments* **67** (1996), 849-850.
- D. Strele, R. Schrittwieser, C. Winkler, P. Krumm, "A simple source for a C₆₀-plasma", *Plasma Sources Sci. Technol.* **5** (1996), 603-606.

1997

- Z.N. Andrushchenko, O.K. Cheremnykh, J.W. Edenstrasser, "Effect of plasma flow on the equilibrium of an axisymmetric toroidal magnetic trap", *Journal of Plasma Physics* **58** (1997), 421-432.
- F. Cap, "Radiofrequency Heating of Tokamaks", *International Bilateral Seminars Juelich* **27**, (1997), 239-251.
- F. Cap, "Collocation Methods in Plasma Physics", *International Bilateral Seminars Juelich* **27** (1997), 253-271.
- W. Lindinger, A. Hansel, "Analysis of trace gases at ppb levels by proton transfer reaction mass spectroscopy (PTR-MS)." *Plasma Sources Sci. Technol.* **6** (1997) 111-117.

- S. Matejcek, A. Kiendler, P. Cicman, J. Skalny, P. Stampfli, E. Illenberger, Y. Chu, A. Stamatovic, T.D. Märk, "Electron attachment to molecules and clusters of atmospheric relevance: oxygen and ozone." *Plasma Sources Sci. Technol.* **6** (1997) 140-146.
- D. Strele, M. Koepke, R. Schrittwieser, P. Winkler, "A simple heatable Langmuir probe for alkali plasmas", *Review of Scientific Instruments* **68** (1997), 3751-3754.
- R. Weis, C. Winkler, R. Schrittwieser, "A nozzle beam source for the production of metastable rare gas atoms", *Plasma Sources Sci. Technol.* **6** (1997), 247-249.

1998

- H. Deutsch, K. Becker, S. Matt, T.D. Märk, "Calculated cross sections for the multiple ionization of neon and silicon atoms by electron impact." *Plasma Phys. Control. Fusion* **40** (1998) 1721-1727.
- J.W. Edenstrasser, V.Y. Goloborod'ko, S.N. Reznik, V.A. Yavorskij, S.J. Zweben, "Influence of vacuum region between plasma and the first wall on the poloidal distribution of diffusive loss of charged fusion products in tokamaks", *Czechoslovak Journal of Physics* **48** (1998), 177-182.
- A.Ya. Ender, S. Kuhn, V.I. Kuznetsov, "The Pierce-diode approximation to the single-emitter plasma diode", *Czechoslovak Journal of Physics* **48** (1998), Supplement S2, 251-256.
- H. Gunell, R. Schrittwieser, S. Torvén, "A localized high frequency discharge formed in an beam-plasma discharge", *Physics Letters A* **241** (1998), 281-286.
- N. Jelić, S. Kuhn, R. Schrittwieser, "Revised generalized Child-Langmuir law", *Physics Letters A* **246** (1998), 318-324.
- S. Kuhn, N. Schupfer, A.S. de Assis, M. Hörhager, "Application of a general formalism to nonlinear wave phenomena in unbounded and bounded plasmas", *Physics Scripta* **T75** (1998), 226-228.
- C. Mair, T. Fiegele, F. Biasioli, T.D. Märk, "Ion-surface reaction studies relevant to fusion edge plasmas", *Czech. J. Phys.* **48** (1998) 363-368
- F. Mairey, S. Kuhn, "Kinetic study of electron impact ionization in a bounded helium plasma", *Czechoslovak Journal of Physics* **48** (1998), Suppl. S2, 225-230.
- S. Matt, D. Muigg, G. Denifl, M. Sonderegger, T. Fiegele, R. David, V. Grill, P. Scheier, T.D. Märk, H. Deutsch, K. Becker, A. Stamatovic, "Experimental and theoretical determination of electron ionization cross sections for atoms, molecules and molecular ions relevant to fusion edge plasmas", *Czech. J. Phys.* **48** (1998) 333-338.
- D. Strele, S. Tscholl, C. Winkler, R. Schrittwieser, "A heatable Langmuir probe for alkali plasmas", *Contributions to Plasma Physics* **38** (1998), Special Issue, p. 110-114.
- V.A. Yavorskij, J.W. Edenstrasser, V.Ya. Goloborod'ko, S.N. Reznik, S.J. Zweben, "Fokker-Planck modelling of delayed loss of charged fusion products in TFTR", *Nuclear Fusion* **38** (1998), 1565-1576.

1999

- Z.N. Andrushchenko, O.K. Cheremnykh, J.W. Edenstrasser, "Global Alfvén eigenmodes in a stellarator with trapped energetic particles", *Physics of Plasmas* **6** (1999), 2462-2471.
- C. Avram (Ionita), R. Schrittwieser, M. Sanduloviciu, "Possible excitation and ionisation processes in a 'collisionless' alkaline plasma", *International Journal for Mass Spectrometry* **184** (1999), 129-143.
- C. Avram (Ionita), R. Schrittwieser, M. Sanduloviciu, "Current jumps and hysteresis in a single-ended Q-machine in connection with the electrostatic ion-cyclotron instability", *Contributions to Plasma Physics* **39** (1999), 223-233.
- C. Avram (Ionita), R. Schrittwieser, M. Sanduloviciu, "Nonlinear effects in the current-voltage characteristic of a low-density Q-machine plasma: I. Related to the potential relaxation instability", *J. Phys. D: Applied Physics* **32** (1999), 2750-2757.
- C. Avram (Ionita), R. Schrittwieser, M. Sanduloviciu, "Nonlinear effects in the current-voltage characteristic of a low-density Q-machine plasma: II. Related to the electrostatic ion-cyclotron instability", *Journal of Physics D: Applied Physics* **32** (1999), 2758-2762.
- O.K. Cheremnykh, J.W. Edenstrasser, "Stationary tokamak equilibria for the case of an incompressible plasma", *Physica Scripta* **60** (1999), 423-432.
- O.K. Cheremnykh, J.W. Edenstrasser, V.V. Gorin, "Relaxation of a non-ideal incompressible plasma with mass flow", *Journal of Plasma Physics* **62** (1999), 195-202.
- V. Goloborod'ko, V. Belikov, J. Edenstrasser, S. Reznik, K. Schöpf, V. Yavorskij, "Numerical simulation of core-localized alpha-driven Alfvén eigenmodes in tokamaks", *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES* **2** (1999), 267-270.
- T. Gyergyek, "Experimental study of the nonlinear dynamics of a harmonically forced double layer." *Plasma Phys. Control. Fusion* **41** (1999) 175-190.
- A. Hansel, A. Jordan, C. Warneke, R. Holzinger, A. Wisthaler, W. Lindinger, "Proton-transfer-reaction mass spectrometry (PTR-MS): on-line monitoring of volatile organic compounds at volume mixing ratios of a few pptv. *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** (1999) 332-336.
- C. Mair, T. Fiegele, F. Biasioli, R. Worgötter, V. Grill, M. Lezius, T.D. Märk, "Surface-induced reactions of polyatomic ions and cluster ions." *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** (1999) 191-202.
- V. Petržílka, K. Jakubka, R. Klíma, L. Krlín, P. Pavlo, J. Stöckel, F. Žaček, D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, J.A. Tataronis, V. Fuchs, M. Goniche, "Plasma biasing by fast particles generated in front of the CASTOR and TORE SUPRA tokamak LH grills", *Czechoslovak Journal of Physics* **49** (1999), Suppl. S3, 127-140.
- H.K. Pulker, "Optical coatings deposited by ion and plasma PVD processes." *Surface & Coatings Technology* **112** (1999) 250-256.
- K. Schöpf, "Fusion plasma self-ignition by nonlinear dynamic evolution", *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES* **2** (1999), 242-245.

2000

- C. Avram (Ionita), R. Schrittwieser, "The potential relaxation instability in a single-ended Q-machine at very low densities", *Analele Stiintifice ale Universitatii "Al. I. Cuza" din Iasi XLVI* (2000), p. 67-70.
- C. Avram (Ionita), R. Schrittwieser, M. Sanduloviciu, "Self-organisation related to non-linearity emphasised in a Q-machine", *Analele Stiintifice ale Universitatii "Al. I. Cuza" din Iasi XLVI* (2000), p. 113-116.
- H. Deutsch, K. Becker, T.D. Märk, "Calculated cross sections for the multiple ionization of nitrogen and argon atoms by electron impact." *Plasma Phys. Control. Fusion* **42** (2000) 489-499.
- T. Gyergyek, M. Čerček, R. Schrittwieser, C. Winkler, D. Strele, "Nonlinear dynamics of a harmonically forced double layer in a discharge plasma", *Progress of Theoretical Physics*, Supplement **139** (2000), 353-362.
- A. Harms, K. Schöpf, G. Miley, D. Kingdon, "Principles of fusion energy", *Monograph*, World Scientific Publ. Co., Singapore (2000).
- M.P. Leubner, "Wave induced suprathermal tail generation of electron velocity space distributions", *Planetary and Space Science* **48** (2000), 133-141.
- M.P. Leubner, "Theoretical interpretation of Jupiter's multi-banded whistler mode emission", *Journal of Geophysical Research* **105** (2000), 21261-21265.
- M.P. Leubner, "Hierarchical quantization of fundamental cosmic structure scales", *Gravitation and Cosmology Supplement* **6** (2000), 144-147.
- M.P. Leubner, N. Schupfer, "Mirror instability thresholds in suprathermal space plasmas", *Journal of Geophysical Research* **105** (2000), 27387-27391.
- M. Sanduloviciu, R. Schrittwieser, E. Lozneau, C. Avram (Ionita), P. Balan and V. Pohoată, "Flicker noise related to electrical double layer dynamics", *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES* **3** (2000), 614-617.
- R. Schrittwieser, C. Avram (Ionita), P.C. Balan, V. Pohoată, C. Stan, M. Sanduloviciu, "New insights into the formation of nonlinear space charge structures in various plasmas", *Physica Scripta* **T84** (2000), 122-127.
- D. Strele, C. Winkler, R. Schrittwieser, "Change of the Potential Relaxation Instability in a plasma containing heavy C-60(-) ions". In: Y. Nakamura, T. Yokota, P.K. Shukla (eds.), *Frontiers in Dusty Plasmas* (Elsevier 2000) 497-500.
- D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, "Influence of initial energy on the effective secondary-electron emission coefficient in the presence of an oblique magnetic field", *Contributions to Plasma Physics* **40** (2000), 484-490.
- C. Winkler, D. Strele, S. Tscholl, R. Schrittwieser, "On the contamination of Langmuir probes in a potassium plasma", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **42** (2000), 217-233.
- V. Yavorskij, V. Goloborod'ko, K. Schöpf, J. Edenstrasser, S. Kuhn, S. Reznik, S. Zweben "Charged fusion product fluxes in the tokamak SOL region, *Contributions to Plasma Physics* **40** (2000), 346-351.

2001

- C. Agheorghiesei, G. Popa, R. Schrittwieser, C. Avram (Ionita), "Ion space charge structures: formation and properties, experiment and simulation", *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 4* (2001), 555-558.
- F. Cap, "The MHD theorems by Kaplan and Crocco and their consequences for MHD flow", *Sitzungsberichte der ÖAW, Abt. II/04* **210** (2001), 1-7.
- H. Deutsch, K. Becker, T.D. Märk, "Calculated cross sections for the multiple ionization of krypton and chromium atoms by electron impact". *Contributions to Plasma Physics* **41** (2001) 73-83.
- M.P. Leubner, "Energetic tail evolution of auroral electron spectra", *Physics and Chemistry of the Earth* **26** (2001), 61-64.
- M.P. Leubner, N. Schupfer, "A general kinetic mirror instability criterion for space applications", *Journal of Geophysical Research* **106** (2001), 12993-12998.
- E. Lozneau, C. Borcia, S. Popescu, M. Sanduloviciu, C. Ionita, D. Dimitriu, V. Ignatescu, R. Schrittwieser, "On the origin of flicker noise in various plasmas", *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 4* (2001), 331-334.
- M. Sanduloviciu, R. Schrittwieser, C. Ionita, E. Lozneau, D. Dimitriu, V. Ignatescu, "On the excitation of low-frequency instabilities in magnetized plasmas", *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 4* (2001), 317-321.
- R. Schrittwieser, C. Ionita, P.C. Balan, Jose A. Cabral, H.F.C. Figueiredo, V. Pohoatã, C. Varandas, "Application of emissive probes for plasma potential measurements in fusion devices", *Contrib. to Plasma Physics* **41** (2001), 494-503.
- F. Subba, R. Zanino, "A 2D fluid model of the scrape-off layer (SOL) using adaptive unstructured finite volumes." *Journal of Nuclear Materials* **290-293** (2001) 743-747.
- V. Yavorskij, K. Schöpf, Zh. Andrushchenko, B. Cho, V. Goloborod'ko, S. Reznik, "Analytical models of axisymmetric toroidal magnetic fields with noncircular flux surfaces", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **43** (2001), 249-269.

2002

- J. Adámek, P. Balan, I. Ďuran, M. Hron, C. Ionita, L. Kryška, E. Martinez, R. Schrittwieser, J. Stöckel, M. Tichý, G. Van Oost, "Fluctuation measurements with emissive probes in tokamaks", *Czech. Journal of Physics* **52** (2002), 1115-1120.
- C. Agheorghiesei, C. Chiorescu, G. Popa, C. Ionita, R. Schrittwieser, "Ion beam generation in a DP system", *Romanian Reports in Physics* **54** (2002), 229-234.
- Zh. Andrushchenko, V. Pavlenko, K. Schöpf, "Theory of zonal flow generation by flute type turbulence", *Physica Scripta* **66** (2002), 326-331.
- D.G. Dimitriu, V. Ignătescu, C. Ionita, E. Lozneau, M. Sanduloviciu, R.W. Schrittwieser, "New features of current-driven low-frequency instabilities in a Q-machine plasma", *Romanian Reports in Physics* **54** (2002), 161-168.
- D.G. Dimitriu, S. Popescu, P. Balan, C. Ionita, E. Lozneau, R. Schrittwieser, M. Sanduloviciu, "Self-organized anode structures acting as stimulators of oscillations in a double plasma machine", *Romanian Reports in Physics* **54** (2002), 217-222.

- T. Gyergyek, M. Čerček, R. Schrittwieser, C. Ionita, "Experimental study of the creation of a fire-rod I: temporal development of the electron energy distribution function", *Contributions to Plasma Physics* **42** (2002), 508-525.
- V. Ignătescu, D.-G. Dimitriu, C. Ionita, E. Lozneau, M. Sanduloviciu, R. Schrittwieser, "The influence of the background plasma density on the dynamics of a fireball in a DP-machine", *Romanian Reports in Physics* **54** (2002), 177-184.
- S. Kuhn, F. Subba, D. Tskhakaya, "Kinetic and fluid studies on the plasma-wall transition (PWT) and the scrape-off layer (SOL) in tokamak plasmas", *Romanian Reports in Physics* **54** (2002), 19-37.
- M.P. Leubner, "A non-extensive entropy approach to kappa-distributions", *Astrophysics and Space Science* **282** (2002), 573-579.
- M.P. Leubner, N. Schupfer, "A universal mirror wave-mode threshold condition for non-thermal space plasma environments", *Nonlin. Proc. Geophysics* **9** (2002), 75-78.
- K. Schöpf, V. Yavorskij, V. Goloborod'ko, S. Reznik, "3D Fokker-Planck modeling of fast ion loss in tokamaks", *Kerntechnik* **67** (2002), 285-289.
- R. Schrittwieser, J. Adánek, P. Balan, J.A. Cabral, H. Fernandes, H.F.C. Figueiredo, C. Hidalgo, M. Hron, C. Ionita, K. Jakubka, L. Kryška, E. Martines, M.A. Pedrosa, V. Pohoată, J. Stöckel, M. Tichý, G. Van Oost, C. Varandas, "Determination of the plasma potential in the edge region of magnetised fusion plasmas by means of electron emissive probes", *Romanian Reports in Physics* **54** (2002), 39-51.
- R. Schrittwieser, J. Adánek, P. Balan, M. Hron, C. Ionita, K. Jakubka, L. Kryška, E. Martines, J. Stöckel, M. Tichý, G. Van Oost, "Measurements with emissive probes in the CASTOR tokamak", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **44** (2002), 567-578.
- F. Subba, X. Bonnin, R. Schneider, S. Kuhn, "Computational modeling of a purely neoclassical scrape-off layer", *Contributions to Plasma Physics* **42** (2002), 350-355.
- F. Subba, D. Tskhakaya jr., R. Schneider, S. Kuhn, "Kinetic and fluid study of classical transport phenomena in scrape-off layer plasmas", *Contributions to Plasma Physics* **42** (2002), 372-378.
- F. Subba, D. Tskhakaya jr., H. Bürbaumer, U. Holzmüller-Steinacker, N. Schupfer, M. Stanojević, S. Kuhn, "Including the effect of secondary-electron emission at the divertor targets in code modelling", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **44** (2002), 61-70.
- D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, "Effect of $E \times B$ drift on the plasma flow at the magnetic presheath entrance", *Contributions to Plasma Physics* **42** (2002), 302-308.
- D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, V. Petržilka, R. Khanal, "Effects of energetic electrons on magnetized electrostatic plasma sheaths", *Phys. Plasmas* **9** (2002), 2486-2496.
- D.D. Tskhakaya, P.K. Shukla, F. Subba, "On the shielding of a dust grain field by ions in plasmas", *Physics Letters A* **300** (2002), 619-627.
- D.D. Tskhakaya sr., P. K. Shukla, F. Subba, S. Kuhn, "Behaviour of a dust cloud in the plasma sheath adjacent to a conducting wall", *Phys. Lett. A* **302** (2002), 190-195.
- V. Yavorskij, D. Darrow, V. Goloborod'ko, S. Reznik, U. Holzmüller-Steinacker, N. Gorelenkov, K. Schöpf, "Fast ion non-adiabaticity in spherical tokamaks", *Nuclear Fusion* **42** (2002), 1210-1215.

2003

- I. Alcaide, P.C. Balan, L. Conde, C. Ionita, R. Schrittwieser, "Low frequency waves and ionisation instabilities", *Contributions to Plasma Physics* **43** (2003), 273-275.
- P. Balan, R. Schrittwieser, C. Ionita, J.A. Cabral, H.F.C. Figueiredo, H. Fernandes, C. Varandas, J. Adámek, M. Hron, J. Stöckel, E. Martines, M. Tichý, G. Van Oost, "Emissive probe measurements of the plasma potential fluctuations in the edge of the ISTTOK and CASTOR tokamaks", *Review of Scientific Instruments* **74** (2003), 1583-1587.
- S. Cernusca, HP. Winter, F. Aumayr, A. Qayyum, W. Schustereder, C. Mair, P. Scheier, T.D. Märk, "Edge plasma-relevant ion-surface collision processes", *Int. J. Mass. Spectrom.* **223-224** (2003) 21-36
- D.P. Coster, X. Bonnin, G. Corrigan, R. Dejarnac, M. Fenstermacher, W. Fundamenski, A. Geier, J. Hogan, A. Kallenbach, A. Kirschner, K. Krieger, A. Loarte, G. Matthews, R. A. Pitts, G. Porter, R. Pugno, D. Reiser, S. Sipila, J. Spence, P.C. Stangeby, E. Tsitrone, D. Tskhakaya, M. Wischmeier, "An overview of JET edge modelling activities", *Journal of Nuclear Materials* **313-316** (2003), 868-872.
- D.G. Dimitriu, V. Ignătescu, E. Lozneanu, C. Ionita, M. Sanduloviciu, R. Schrittwieser, "The influence of electron impact ionisations on low frequency instabilities in a magnetised plasma", *International Journal of Mass Spectrometry* **223/224** (2003), 141-158.
- D.G. Dimitriu, C. Ionita, E. Lozneanu, M. Sanduloviciu, R.W. Schrittwieser, "Generation and analysis of a multiple double layer in plasma", *Analele Stiintifice ale Universitatii "Al. I. Cuza" din Iasi*, vol. **XLIX** (2003), 55-61.
- M. Ghoranneviss, A. Hogabri, S. Kuhn, "MHD activity at low $q(a)$ in Iran Tokamak 1 (IR-T1)", *Nuclear Fusion* **43** (2003), 1-6.
- K. Gluch, P. Scheier, W. Schustereder, T. Tepnual, L. Feketeova, C. Mair, S. Matt-Leubner, A. Stamatovic, T.D. Märk, "Cross sections and ion kinetic energies for electron impact ionization of CH₄". *Int. J. Mass Spectrometry* **228** (2003) 307-320.
- T. Gyergyek, M. Čerček, R. Schrittwieser, C. Ionita, G. Popa, V. Pohoatã, "Experimental study of the creation of a fire-rod II: Emissive probe measurements", *Contributions to Plasma Physics* **43** (2003), 11-24.
- N. Jelić, S. Kuhn, R. Schrittwieser, "Similarity rules for collisionless hot-filament discharges", *Contributions to Plasma Physics* **43** (2003), 94-100.
- N. Jelić, R. Schrittwieser, S. Kuhn, "Effects of electron-absorbing boundaries on the plasma parameters of a hot-filament discharge", *Contributions to Plasma Physics* **43** (2003), 111-121.
- F. Kazeminezhad, S. Kuhn, A. Tavakoli, "Vlasov model using kinetic phase point trajectories", *Physical Review E* **67** (2003), 26704-1-16.
- M.P. Leubner, "Wave induced energetic particle generation and space plasma modeling", *Space Science Review* **107** (2003), 361-368.
- M.P. Leubner, "An analytical representation of non-gyrotropic distributions and related space applications." *Planetary and Space Science* **51** (2003) 723-729.

- G.F. Matthews, W. Schustereder, N. Cant, S.K. Erents, J. Vince, A. Qayyum, C. Mair, P. Scheier, T.D. Märk, "Ion optics evaluation of the plasma ion mass spectrometer (PIMS) designed for the JET tokamak", *Int. J. Mass. Spectrom.* **223-224** (2003) 45-53.
- V. Pohořá, G. Popa, R. Schrittwieser, C. Ionita, M. Čerček, "Properties and control of anode double layer oscillations and related phenomena", *Physical Review E* **68** (2003), 16405-1-16405-8, on line.
- P.K. Shukla, D.D. Tskhakaya sr., "Generation of short wavelength electrostatic modes by rotating dust grains in magnetized plasmas." *Physics Letters A* **318** (2003) 579-583.
- G.N. Strauss, H.K. Pulker, "Plasma diagnostics of ion and plasma PVD processes." *Thin Solid Films* **442** (2003) 66-73.
- I. Teliban, P.C. Balan, D. Luca, C. Ionita, R. Schrittwieser, G. Popa, "Characterisation of a cavity-hollow cathode plasma assisted sputtering source", *An. Stiintifice ale Universitatii "Al. I. Cuza" din Iași*, vol. **XLIX** (2003), 119-125.
- S. Teodoru, D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, D.D. Tskhakaya sr., G. Popa, "Analytic and PICsimulation results for an ionic sheath", *Analele Stiintifice ale Universitatii "Al. I. Cuza" din Iași* **XLIX** (2003), 43-50.
- D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, "Particle-in-cell simulations of the plasma-wall transition with a magnetic field almost parallel to the wall", *Journal of Nuclear Materials* **313-316** (2003), 1119-1122.
- A. Qayyum, C. Mair, T. Tepnual, W. Schustereder, P. Scheier, T.D. Märk; Charge exchange and surface-induced dissociation of doubly charged molecular ions $C_6H_5^{2+}$, $C_6H_6^{2+}$ and $C_7H_8^{2+}$ upon impact on a stainless steel surface. *Nucl. Instrum. Meth. B* **205** (2003) 714-718
- A. Qayyum, W. Schustereder, C. Mair, W. Hess, P. Scheier, T.D. Märk; Reactive Interactions of Hydrogen Molecular Ions H_2^+ , D_2^+ , H_3^+ , D_3^+ and HD^+ with Carbon Tiles from TORE SUPRA. *Phys. Scripta* **T103** (2003) 29-33
- A. Qayyum, W. Schustereder, C. Mair, P. Scheier, T.D. Märk, S. Cernusca, HP. Winter, F. Aumayr; Electron emission and molecular fragmentation during hydrogen and deuterium ion impact on carbon surfaces. *J. Nucl. Mater.* **313-316** (2003) 670-674
- A. Qayyum, W. Schustereder, C. Mair, T. Tepnual, P. Scheier, T.D. Märk; Ion surface collisions of CH_3^+ , CH_4^+ , CH_5^+ and CD_4^+ . *Radiat. Phys. Chem.* **68** (2003) 257-261
- A. Qayyum, T. Tepnual, C. Mair, S. Matt-Leubner, P. Scheier, Z. Herman, T.D. Märk; The role of internal energy of polyatomic projectile ions in surface-induced dissociation. *Chem. Phys. Lett.* **376** (2003) 539-547
- G. Van Oost, J. Adámek, V. Antoni et al., "Turbulent transport reduction by $E \times B$ velocity shear during edge plasma biasing: recent experimental results", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **45** (2003), 612-643.
- V. Yavorskij, V. Goloborod'ko, K. Schöpf, S. Sharapov, C. Challis, S. Reznik, D. Stork, "Confinement of fusion alpha-particles in JET hollow current equilibrium", *Nuclear Fusion* **43** (2003), 1077-1090.

2004

- J. Adánek, J. Stöckel, M. Hron, J. Ryszawy, M. Tichý, R. Schrittwieser, C. Ionita, P. Balan, E. Martines, G. Van Oost, "A novel approach to direct measurement of the plasma potential", *Czechoslovak Journal of Physics* **54** (2004), Suppl. C, C95 – C99.
- P. Balan, R. Schrittwieser, J. Adánek, et al., "Measurements of the parallel and perpendicular ion temperatures by means of an ion-sensitive segmented tunnel probe", *Contributions to Plasma Physics* **44** (2004), 683-688.
- D.G. Dimitriu, C. Găman, M. Mihai-Plugaru, G. Amarandei, C. Ionita, E. Lozneau, M. Sanduloviciu, R. Schrittwieser, "Simple Experimental Methods to Control Chaos in a DP Machine Plasma", *Acta Physica Slovaca* **54** (2) (2004), 89-96.
- D.G. Dimitriu, C. Ionita, E. Lozneau, M. Sanduloviciu, R.W. Schrittwieser, "Generation and control of oscillations in plasmas", *Analele Stiintifice ale Universitatii "Al. I. Cuza" din Iasi*, vol. **L** (2004), 113-121.
- D.G. Dimitriu, E. Lozneau, C. Ionita, M. Sanduloviciu, R. Schrittwieser, "Flicker noise related to uncorrelated dynamics of multiple double layers in plasma", *Romanian Journal of Physics* **49** (2004), 333-340.
- D.G. Dimitriu, E. Lozneau, C. Ionita, M. Sanduloviciu, R. Schrittwieser, "Chaos control in experimental and industrial plasma devices", *Romanian Journal of Physics* **49** (2004), 341-348.
- W. Fundamenski, W. Sailer, JET EFDA contributors, "Radial propagation of Type-I ELMs on JET". *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** (2004) 233-259.
- J.P. Gunn, R. Schrittwieser, P. Balan, C. Ionita, J. Stöckel, J. Adánek, I. Ďuran, M. Hron, R. Pánek, O. Bařina, R. Hrach, M. Vicher, G. Van Oost, T. Van Rompuy, E. Martines, "Tunnel probes for measurements of the electron and ion temperature in fusion plasmas", *Review of Scientific Instruments* **75** (2004), 4328-4330.
- C. Ionita, P. Balan, R. Schrittwieser, H.F.C. Figueiredo, C. Silva, C.A.F. Varandas, R.M.O. Galvão, "An arrangement of emissive probe and cold probes for fluctuation and Reynolds stress measurements", *Rev. Sci. Instruments* **75** (2004), 4331-4333.
- C. Ionita, D.-G. Dimitriu, R.W. Schrittwieser, "Elementary processes at the origin of the generation and dynamics of multiple double layers in DP machine plasma", *International Journal of Mass Spectrometry* **233** (2004), 343-354.
- V. Kiptily, Y. Baranov, R. Barnsley, L. Bertalot, N. Hawkes, A. Murari, S. Popovichev, S. Sharapov, D. Stork, V. Yavorskij, JET-EFDA contributors, "First Gamma-Ray measurements of fusion alpha particles in JET Trace tritium experiments", *Physical Review Letters* **93** (2004), 115001 (4pp).
- L. Krlin, R. Panek, P. Pavlo, V. Petržilka, J. Stöckel, V. Svoboda, S. Kuhn, D. Tskhakaya, M. Tendler, "Anomalous impurity diffusion in models of tokamak edge plasma turbulence", *Czechoslovak Journal of Physics* **54** (2004), Suppl. C, 157-163.
- M.P. Leubner, "Fundamental issues on kappa-distributions in space plasmas and interplanetary proton distributions", *Physics of Plasmas* **11** (2004), 1308-1316.
- M.P. Leubner, "Core-Halo distribution functions – a natural equilibrium state in generalized thermo-statistics", *Astrophysical Journal* **604** (2004), 469-478.

- R. Pánek, L. Krlín, D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, J. Stöckel, P. Pavlo, M. Tendler, V. Svoboda, V. Petržílka, "Anomalous diffusion and radial electric field generation due to edge plasma turbulence", *Contributions to Plasma Physics* **44** (2004), 203-204.
- L. Popova, D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, et al., "Study of the ionization rate in the scrape-off layer", *Contributions to Plasma Physics* **44** (2004), 252-255.
- R. Schrittwieser, J. Adámek, P. Balan, O. Bařina, P. De Beule, I. Āuran, J.P. Gunn, M. Hron, C. Ionita, E. Martines, R. Pánek, J. Stöckel, G. Van Oost, T. Van Rompuy, "Determination of the electron and ion temperature by means of tunnel probes", *Analele Stiintifice ale Universitatii "Al. I. Cuza" din Iași*, vol. **L** (2004), 53-65.
- P.K. Shukla, M. Marklund, D.D. Tskhakaya sr. et al, "Nonlinear effects associated with interactions of intense photons with a photon gas." *Physics of Plasmas* **11** (2004) 3767-3777.
- G.N. Strauss, R. Stärz, H.K. Pulker, N. Kaiser, "Plasmaanalyse mit dem MIEDA-System." *Galvanotechnik* **95** (2004) 1254-1256.
- D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, "The magnetised plasma-wall transition: theory and PIC simulation", *Contributions to Plasma Physics* **44** (2004), 564-570.
- D.D. Tskhakaya sr., B. Eliasson, P.K. Shukla, S. Kuhn, "On the theory of plasma-wall transition layers", *Physics of Plasmas* **11** (2004), 3945-3954.
- D.D. Tskhakaya sr., P.K. Shukla, B. Eliasson, "Potential around a dust grain placed in the plasma sheath." *Physics Letters A* **331** (2004) 404-408.
- V. Yavorskij, V. Goloborod'ko, K. Schoepf, S. Sharapov, D. Stork, "Confinement criteria for fusion alpha particles in current hole tokamaks", *Nuclear Fusion* **44** (2004), L5-L9.

2005

- J. Adámek, J. Stöckel, I. Āuran, M. Hron, R. Pánek, M. Tichý, R. Schrittwieser, C. Ionita, P. Balan, E. Martines, G. Van Oost, "Comparative measurements of the plasma potential with the ball-pen and emissive probes on the CASTOR tokamak", *Czechoslovak Journal of Physics* **55** (2005), 235-242.
- M. Aflori, G. Amarandei, L.M. Ivan, M. Mihai-Plugaru, D.G. Dimitriu, C. Ionita, R.W. Schrittwieser, "Experimental control of the generation and dynamics of a complex space charge structure in DP machine plasma", *Acta Physics Slovaca* **55** (2005), 423-427.
- P.C. Balan, R. Apetrei, D. Luca, C. Ionita, R. Schrittwieser, G. Popa "Electrical and optical diagnosis of a cavity hollow-cathode post-discharge used as a sputtering source", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* **7** (2005), 2459-2464.
- G. Conway, B.D. Scott, J. Schirmer, M. Reich, A. Kendl, "Direct measurement of zonal flows and geodesic acoustic mode (GAM) oscillations in ASDEX Upgrade using Doppler reflectometry", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **47** (2005), 1165-1185.
- H. Deutsch, K. Becker, A.N. Grum-Grzhimailo, M. Probst, S. Matt-Leubner, T.D. Märk, "Calculated electron impact ionization cross sections of excited Ne atoms using the DM formalism". *Contributions to Plasma Physics* **45** (2005) 494-499.

- G. Gluch, S. Feil, P. Scheier, et al., "Partial and differential electron impact ionization cross-sections for small hydrocarbon molecules". In: R. Clark, D. Reiter (eds.): Nuclear Fusion Research - Understanding Plasma-Surface Interactions. *Springer Series in Chemical Physics* **78** (2005) 437-456.
- S. Günter, C. Angioni, M. Apostoliceanu et al., "Overview of ASDEX Upgrade results - development of integrated operating scenarios for ITER", *Nuclear Fusion* **45** (2005) S98–S108.
- N.C. Hawkes, V. Yavorskij, J. Adams, Y. Baranov, L. Bertalot, C. Challis, S. Conroy, V. Goloborod'ko, V. Kiptily, S. Popovichev, K. Schöpf, S. Sharapov, D. Stork, E. Surrey and JET EFDA Contributors "Tritium fast ion distribution in JET current hole plasmas", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **47** (2005), 1475-1493.
- L.M. Ivan, G. Amaranđei, M. Aflori, M. Mihai-Plugaru, D.G. Dimitriu, C. Ionita, R.W. Schrittwieser, "Physical processes at the origin of appearance and dynamics of multiple double layers", *Acta Physica Slovaca* **55** (2005), 501-506.
- A. Kendl, B.D. Scott, "Shear flow reduction by the geodesic transfer mechanism in tokamak edge turbulence", *Physics of Plasmas* **12** (2005), 064506.
- V.G. Kiptily, J.M. Adams, L. Bertalot, A. Murari, S.E. Sharapov, V. Yavorskij, B. Alper, R. Barnsley, P. de Vries, C. Gowers, L.-G. Eriksson, P.J. Lomas, M.J. Mantsinen, A. Meigs, J.-M. Noterdaeme, F.P. Orsitto, JET-EFDA Contributors (K. Schöpf, V. Goloborod'ko), "Gamma-ray imaging of D and ⁴He ions accelerated by ion-cyclotron-resonance heating in JET plasmas", *Nucl. Fusion* **45** (2005), L21-L25.
- M.P. Leubner, "An analytical representation of non-gyrotropic distributions and related space applications", *Planetary and Space Science* **51** (2005), 723-729.
- M.P. Leubner, "Nonextensive theory of dark matter and gas density profiles", *Astrophysical Journal* **632** (2005) L1-L4.
- M.P. Leubner, Z. Vörös, "A nonextensive entropy path to probability distributions in solar wind turbulence", *Nonlinear Processes in Geophysics* **12** (2005), 171-180.
- M.P. Leubner, Z. Vörös, "A nonextensive entropy approach to solar wind intermittency", *Astrophysical Journal* **618** (2005), 547-555.
- S. Matt-Leubner, S. Feil, K. Gluch, J. Fedor, A. Stamatovic, O. Echt, P. Scheier, K. Becker, T.D. Märk, "Energetics, kinetics and dynamics of decaying metastable ions studied with a high-resolution three-sector field mass spectrometer." *Plasma Sources Sci. Technol.* **14** (2005) S26-S30.
- V. Naulin, A. Kendl, O.E. Garcia, A.H. Nielsen, J.J. Rasmussen, "Shear flow generation and energetics in electromagnetic turbulence", *Physics of Plasmas* **12** (2005) 052515.
- R. Pánek, L. Krlín, M. Tendler, D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, V. Svoboda, R. Klima, P. Pavlo, J. Stöckel, V. Petržílka, "Anomalous ion diffusion and radial-electric-field-generation in a turbulent edge plasma potential weakly correlated in time and space", *Physica Scripta* **72** (2005), 327-332.
- H.K. Pulker, "Cold plasma for surface modification and coating of various substrates." *Materials* **2** (2005) 12-13.

- M.A. Pedrosa, C. Hidalgo, E. Calderón, A. Alonso, O. Orozco, J.L. de Pablos, TJ-II team, P. Balan, "Spontaneous edge ExB sheared flow development studies in the TJ-II stellarator", *Czechoslovak Journal of Physics* **55** (2005), 1579-1587.
- K.-U. Riemann, J. Seebacher, D.D. Tskhakaya sr., S. Kuhn, "The plasma-sheath matching problem", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **47**, (2005) 1949-1970.
- A. Sarma, Y. Saitou, R. Schrittwieser, Y. Nakamura, "Observation of the ion-ion instability and its suppression mechanism in a dusty double plasma device ", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **47** (2005), 1415-1429.
- S. Schlichterle, G.N. Strauss, H. Tafelmeier, D. Huber, H.K. Pulker; Reactive Low Voltage Ion Plating (RLVIP) Prozess-, Plasma- und Schichteigenschaften am Beispiel von Ta₂O₅/SiO₂. *Vakuum in Forschung und Praxis* **17** (2005) 210 – 217.
- R. Schrittwieser, C. Ionita, P.C. Balan, C.A.F. Varandas, H.F.C. Figueiredo, C. Silva, H. Fernandes, J. Stöckel, J. Adámek, M. Hron, J. Ryszawy, M. Tichý, E. Martines, G. Van Oost, T. Klinger, R. Madani, R.M.O. Galvão, "Probe methods for direct measurements of the plasma potential", *Rom. J. Physics* **50** (2005), 723-739.
- S.E. Sharapov, B. Alper, F. Andersson, et al., "Experimental studies of instabilities and confinement of energetic particles on JET and on MAST", *Nuclear Fusion* **45** (2005), 1168-1177.
- M. Stanojević, J. Duhovnik, N. Jelić, A. Kendl, S. Kuhn, "Fluid model of the magnetic presheath in a turbulent plasma", *Plasma Phys. Contr. Fus* **47**, (2005), 685.
- S. Teodoru, D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, D. D. Tskhakaya sr., R. Schrittwieser, C. Ioniță, G. Popa, "Kinetic (PIC) simulations for a plane probe in a collisional plasma", *Journal of Nuclear Materials* **337-339**, (2005), 1111-1115.
- D. Tskhakaya jr. S. Kuhn, "Boundary conditions for the multi-ion magnetized plasma-wall transition", *Journal of Nuclear Materials* **337-339**, (2005), 405-409.
- D. Tskhakaya jr. S. Kuhn, "Kinetic (PIC) simulations of the magnetised plasma-wall transition", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **47** (2005), A327-A337.
- D.D. Tskhakaya sr., P.K. Shukla, B. Eliasson, S. Kuhn, "Theory of the plasma sheath in a magnetic field parallel to the wall", *Physics of Plasmas* **12**, (2005), 103503-1-6.

2006

- R. Apetrei, D. Alexandroaei, D. Luca, P. Balan, C. Ionita, R. Schrittwieser, G. Popa, "OES diagnostic of the discharge plasma in a hollow-cathode sputtering source", *Japan Journal of Applied Physics* **45** (2006), 8128-8131.
- R. Apetrei, D. Alexandroaei, D. Luca, P. Balan, C. Ionita, R. Schrittwieser, G. Popa, "Pulsed regime of a hollow-cathode discharge used in a sputter source", *Japan Journal of Applied Physics* **45** (2006), 8132-8136.
- J. Brotánková, J. Adámek, J. Stöckel, E. Martines, G. Popa, C. Costin, R. Schrittwieser, C. Ionita, G. Van Oost, L. van de Peppel, "A probe-based method for measuring the transport coefficient in the tokamak edge region", *Czechoslovak Journal of Physics* **56** (2006), 1321-1328.

- Ya. Ender, S. Kuhn, V.I. Kuznetsov, "The Pierce-diode approximation to the single-emitter plasma diode", *Physics of Plasmas* **13** (2006), 113506.
- A. Kendl, "Plasma turbulence in complex magnetic field structures", *Journal of Plasma Physics* **72** (2006), 1145-1148.
- A. Kendl, B.D. Scott, "Flux surface shaping effects on tokamak edge turbulence and flows", *Physics of Plasmas* **13** (2006), 012504-1 - 012504-9.
- M. Kočan, S. Kuhn, D. Tskhakaya jr., "PIC-simulation resolved period-doubling route to chaos in the classical Pierce diode", *Contributions to Plasma Physics* **46** (2006), 322-327.
- M. Kočan, S. Kuhn, D. Tskhakaya jr., J.D. Skálny, "Particle simulations of the non-linear electron dynamics in the classical Pierce diode", *Journal of Plasma Physics* **72** (2006), 851-855.
- T. Kronberger, M.P. Leubner, E. van Kampen, "Dark matter density profiles: A comparison of nonextensive theory with N-body simulations", *Astronomy and Astrophysics* **453** (2006), 21-25.
- S. Kuhn, K.-U. Riemann, N. Jelic, D.D. Tskhakaya sr., D. Tskhakaya jr., M. Stanojevic, "Link between fluid and kinetic parameters near the plasma boundary", *Physics of Plasmas* **13** (2006), 013503.
- M.P. Leubner, Z. Vörös, W. Baumjohann, "Nonextensive entropy approach to space plasma fluctuations and turbulence", *Advances in Geosciences* **2** (2006), 43-64.
- J.-S. Lönnroth, G. Bateman, M. Bécoulet, P. Beyer, G. Corrigan, C. Figarella, W. Fundamenski, O. E. Garcia, X. Garbet, G. Huysmans, G. Janeschitz, T. Johnson, T. Kiviniemi, S. Kuhn, A. Kritz, A. Loarte, V. Naulin, F. Nave, T. Onjun, G. W. Pacher, H.D. Pacher, A. Pankin, V. Parail, R. Pitts, G. Saibene, P. Snyder, J. Spence, D. Tskhakaya jr., H. Wilson, "Integrated ELM modelling", *Contributions to Plasma Physics* **46** (2006), 726-738.
- A. Marek, I. Picková, P. Kudrna, M. Tichý, R.P. Apetrei, S.B. Olenici, R. Gstrein, R. Schrittwieser, C. Ionita, "Experimental investigation of the change of the electron saturation current of a dc-heated emissive probe", *Czechoslovak Journal of Physics* **56** (2006), Supplement B, B932-B937.
- N. Schupfer, D.D. Tskhakaya sr., R. Khanal, S. Kuhn, F. Aumayr, S. Figueira da Silva, H.P. Winter, "Effect of particle-induced electron emission (PIEE) on the plasma sheath voltage", *Plasma Phys. and Controlled Fusion* **48** (2006), 1093-1103.
- R. Smirnov, Y. Tomita, D. Tskhakaya, T. Takizuka, "Two-dimensional simulation study on charging of dust particles on a plasma-facing wall", *Contributions to Plasma Physics* **46** (2006), 623-627.
- R. Schrittwieser, C. Ionita, J. Adamek, J. Brotánková, J. Stöckel, E. Martinez, C. Costin, G. Popa, L. van de Peppel, G. Van Oost, "Direct measurements of the plasma potential by Katsumata-type probes", *Czech. J. Phys.* **56** (2006), Sup. B, B145-B150.
- R. Schrittwieser, A. Sarma, G. Amarandei, C. Ionita, T. Klinger, O. Grulke, A. Vogelsang, T. Windisch, "Results of direct measurements of the plasma potential using a laser-heated emissive probe", *Physica Scripta* **T123** (2006) 94-98.

- J. Szepvolgyi, Z. Markovic, B. Todorovic-Markovic, Z. Nikolic, I. Mohai, Z. Farkas, M. Toth, E. Kovats, P. Scheier, S. Feil, "Effects of precursors and plasma parameters on fullerene synthesis in RF thermal plasma reactor". *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **26** (2006) 597-608.
- Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya jr., "Gravitational effect on release conditions of dust particles from a plasma-facing wall", *Contributions to Plasma Physics* **46** (2006), 617-622.
- Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya jr., "Charging of a spherical dust particle on a plasma-facing wall." *Journal of Plasma Physics* **72** (2006) 1015-1018.
- D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, Y. Tomita, "Formulation of boundary conditions for unmagnetized multi-ion component plasma sheath", *Contributions to Plasma Physics* **46** (2006), 649-654.
- D.D. Tskhakaya sr., P.K. Shukla, B. Eliasson, S. Kuhn, "Theory of the rf-driven plasma sheath", *Physica Scripta* **74** (2006), 686-691.
- Z. Vörös, M.P. Leubner, W. Baumjohann, "Cross-scale coupling induced intermittency near interplanetary shocks", *J. Geophys. Res.* **111** (2006), A02102.

2007

- F.X. Bronold, K. Matyash, D. Tskhakaya, R. Schneider, H. Fehske, "Radio-frequency discharges in oxygen: I. Modelling", *Journal of Physics D: Applied Physics* **40** (2007), 6583-6592.
- R. Dejarnac, J.P. Gunn, J. Stöckel, J. Adámek, J. Brotánková, C. Ionita, "Study of ion sheath expansion and anisotropy of the electron parallel energy distribution in the CASTOR tokamak", *Plasma Phys. and Controlled Fusion* **49** (2007), 1791-1808.
- D.G. Dimitriu, M. Aflori, L.M. Ivan, C. Ionita, R.W. Schrittwieser, "Common physical mechanism for concentric and non-concentric multiple double layers in plasma", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **49** (2007), 237-248.
- D. Erzen, J.P. Verboncoeur, J. Duhovnik, N. Jelic, "S-PARMOS – a method for simulating single charged particle motion in external magnetic and electric fields", *The International Journal of Multiphysics* **1** (2007) 419-432.
- C. Ionita, D.G. Dimitriu, R.W. Schrittwieser, "Complex space charge structures in laboratory and natural plasmas", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* **9** (2007), 2954-2959.
- N. Jelic, K.U. Riemann, T. Gyergyek, S. Kuhn, M. Stanojevic, J. Duhovnik, "Fluid and kinetic parameters near the plasma-sheath boundary for finite Debye lengths." *Physics of Plasmas* **14** (2007) 103506.
- S. Kuhn, D. Tskhakaya jr., D.D. Tskhakaya sr., "The magnetized plasma-wall transition (PWT) and its relation to fluid boundary conditions", *Computer Physics Communications*, **177** (2007), 80-83.
- N. Mahdizadeh, F. Greiner, T. Happel, A. Kendl, M. Ramisch, B.D. Scott, U. Stroth, "Investigation of the parallel dynamics of drift wave turbulence in toroidal plasmas", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **49** (2007), 1005-1017.

- K. Matyash, R. Schneider, K. Dittmann, J. Meichsner, F.X. Bronold, D. Tskhakaya jr., "Radio-frequency discharges in oxygen. III: Comparison of modeling and experiment". *Journal of Physics D: Applied Physics* **40** (2007), 6601–6607.
- K. Matyash, R. Schneider, F. Taccogna, A. Hatayama, S. Longo, M. Capitelli, D. Tskhakaya jr., F. X. Bronold, "Particle in cell simulation of low temperature laboratory plasmas", *Contributions to Plasma Physics* **47** (2007), 595-634.
- K. Matyash, R. Schneider, F. Taccogna, D. Tskhakaya jr., "Finite size effect of dust charging in the magnetized edge plasma." *J. Nucl. Mat.* **363-365** (2007) 458-461.
- R. Neu, M. Balden, V. Bobkov et al., "Plasma wall interaction and its implication in an all tungsten divertor tokamak." *Plasma Phys. Contr. Fusion* **49** (2007) B59-B70.
- R.A. Pitts, P. Andrew, G. Arnoux, T. Eich, W. Fundamenski, A. Huber, C. Silva, D. Tskhakaya jr. and JET EFDA Contributors, "ELM Transport in the JET Scrape-Off Layer", *Nuclear Fusion* **47** (2007), 1437-1447.
- W. Schustereder, B. Rasul, N. Endstrasser, F. Zappa, V. Grill, P. Scheier, T.D. Märk, "Sticking coefficient and SIMS of hydrocarbons on fusion relevant plasma-sprayed tungsten surfaces." *Nucl. Instr. Meth. B* **258** (2007) 278-281.
- M. Stanojević, J. Duhovnik, N. Jelić, S. Kuhn, "Magnetic presheath in a weakly turbulent multi-component plasma", *Physics of Plasmas* **14** (2007), 013504.
- J. Stöckel, J. Adámek, P. Balan, O. Bilyk, J. Brotánková, R. Dejarnac, P. Devynck, I. Duran, J.P. Gunn, M. Hron, J. Horacek, C. Ionita, M. Kocan, E. Martines, R. Panek, P. Peleman, R. Schrittwieser, G. Van Oost, F. Zacek, "Advanced probes for edge plasma diagnostics on the CASTOR tokamak", *Journal of Physics: Conference Series* **63** (2007), 012001- 1-10.
- G.N. Strauss, S. Schlichterle, H.K. Pulker, "Plasma investigation of PVD processes operating in dc continuous and/or dc pulsed mode." *Vakuum in Forschung und Praxis* **19** (2007) 6-12.
- J. Szepvogyi, Z. Markovic, B. Todorovic-Markovic, Z. Nikolic, I. Mohai, Z. Farkas, M. Toth, E. Kovats, P. Scheier, S. Feil, "Effects of precursors and plasma parameters on fullerene synthesis in RF thermal plasma reactor." *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **26** (2006) 597-608.
- D. Tskhakaya jr., R. Schneider, "Optimization of PIC codes by improved memory management", *Journal of Computational Physics* **225** (2007), 829-839.
- D. Tskhakaya jr., K. Matyash, R. Schneider, F. Taccogna, "The particle-in-cell method", *Contributions to Plasma Physics* **47** (2007), 563-594.
- G. Van Oost, V.V. Bulanin, A.J.H. Donné, E.Z. Gusakov, A. Kraemer-Flecken, L.I. Krupnik, A. Melnikov, S. Nanobashvili, P. Peleman, K.A. Razumova, J. Stöckel, V. Vershkov, J. Adamek, A.B. Altukov, V.F. Andreev, L.G. Askinazi, I.S. Bondarenko, J. Brotankova, A.Yu. Dnestrovskij, I. Duran, L.G. Eliseev, L.A. Esipov, S.A. Grashin, A.D. Gurchenko, G.M.D. Hogewei, M. Hron, C. Ionita, S. Jachmich, S.M. Khrebtov, D.V. Kouprienko, S.E. Lysenko, E. Martines, S.V. Perfilov, A.V. Petrov, A.Yu. Popov, D. Reiser, R. Schrittwieser, S. Soldatov, M. Spolaore, A.Yu. Stepanov, G. Telesca, A.O. Urazbaev, G. Verdoolaege, F. Zacek, O. Zimmermann,

"Multi-machine studies of the role of turbulence and electric fields in the establishment of improved confinement in tokamak plasmas", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **49** (2007) A29-A44.

- I. Voitsekhovitch, V. Kiptily, V. Goloborod'ko, S. Popovichev, Y. Yavorskij, K.D. Zastrow, "Modelling of alpha-particle behaviour in H-mode plasmas with trace tritium at JET." *Nuclear Fusion* **47** (2007) 599-611.

2008

- J. Adamek, M. Kocan, R. Panek, J.P. Gunn, E. Martines, J. Stöckel, C. Ionita, G. Popa, C. Costin, J. Brotankova, R. Schrittwieser, G. Van Oost, "Simultaneous measurements of ion temperature by segmented tunnel and Katsumata probe", *Contributions to Plasma Physics* **48** (2008), 395-399.
- G. Amarandei, D. Dimitriu, A. Sarma, P. Balan, T. Klinger, O. Grulke, C. Ionita, R. Schrittwieser, "Studies on suitable materials for a laser-heated electron-emissive plasma probe." *Romanian Journal of Physics* **53** (2008) 311-316.
- J. Brotankova, E. Martines, J. Adamek, J. Stöckel, G. Popa, C. Costin, C. Ionita, R. Schrittwieser, G. Van Oost, "Novel technique for direct measurement of the plasma diffusion coefficient in magnetized plasma", *Contributions to Plasma Physics* **48** (2008), 418-423.
- E.K. El-Shewy, M.A. Zahran, K. Schöpf, S.A. Elwakil, "Contribution of higher-order dispersion to nonlinear dust acoustic solitary waves in a dusty plasma with different size dust grains and non-thermal ions", *Physica Scripta* (2008) in print.
- G.L. Falchetto, B.D. Scott, P. Angelino, A. Bottino, T. Dannert, V. Grandgirard, S.J. Janhunen, F. Jenko, S. Jolliet, A. Kendl, B. F. McMillan, V. Naulin, A.H. Nielsen, M. Ottaviani, A.G. Peeters, M.J. Pueschel, D. Reiser, T. Ribeiro, M. Romanelli, "The European turbulence code benchmarking effort: turbulence driven by thermal gradients in magnetically confined plasmas", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **50** (2008), in print.
- W. Fundamenski, D.P. Coster, M. Airila, P. Belo, X. Bonnin, A. Chankin, G. Corrigan, S.K. Erents, O.E. Garcia, S. Glowacz, B. Gulejova, A. Kirschner, V. Naulin, A. Nielsen, G. Kirnev, V. Kotov, C. Konz, J. J. Rasmussen, R.A. Pitts, D. Reiter, T. Ribeiro, B.D. Scott, J.D. Strachan, F. Subba, E. Tsitrone, D. Tskhakaya, S. Wiesen, M. Wischmeier, R. Zagórski, EFDA-JET Contributors, Progress in edge plasma transport modelling on JET", *Contributions to Plasma Physics* **48** (2008), 190-195.
- C. Ionita, P. Balan, T. Windisch, C. Brandt, O. Grulke, T. Klinger, R. Schrittwieser, "New results on a laser-heated emissive probe", *Contributions to Plasma Physics* **48** (2008), 453-460.
- A. Kendl, "Two-dimensional turbulence in magnetized plasmas." *European Journal of Physics* **29** (2008) 911-926.
- M.P. Leubner, "Consequences of entropy bifurcation in non-Maxwellian astrophysical environments", *Nonlin. Processes Geophys.*, **15** (2008) 531-640.

- A. Marek, M. Jilek, I. Pickova, P. Kudrna, M. Tichy, R. Schrittwieser, C. Ionita, "Emissive probe diagnostic in low temperature plasma – effect of the space charge and variations of the electron saturation current", *Contributions to Plasma Physics* **48** (2008), 491-496.
- R. Schrittwieser, C. Ionita, P. Balan, R. Gstrein, O. Grulke, T. Windisch, C. Brandt, T. Klinger, R. Madani, G. Amarandei, "Laser-heated emissive plasma probe", *Review of Scientific Instruments* **79** (2008) 083508.
- R. Schrittwieser, C. Ionita, P. Balan, C. Silva, H. Figueiredo C.A.F. Varandas, J. Juul Rasmussen, V Naulin, "Turbulence and transport measurements with cold and emissive probes in ISTTOK", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **50** (2008) 055004 (8pp).
- R.L. Stenzel, C. Ionita, R. Schrittwieser, "Dynamics of fireballs", *Plasma Sources Science and Technology* **17** (2008), 035006 (11pp).
- F. Taccogna, R. Schneider, K. Matyash, S. Longo, M. Capitelli, D. Tskhakaya jr., "Plasma-neutral interaction in kinetic models for the divertor region", *Contributions to Plasma Physics* **48** (2008), 147-152.
- Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya jr., "Effect of oblique magnetic field on release conditions of dust üarticle from plasma-facing wall", *Contributions to Plasma Physics* **48** (2008), 285-289.
- D. Tskhakaya jr., F. Subba, X. Bonnin, D. Coster, W. Fundamenski, R.A. Pitts, JET EFDA Contributors, "On kinetic effects during the parallel transport in the SOL", *Contributions to Plasma Physics* **48** (2008), 89-93.
- D. Tskhakaya jr., S. Kuhn, Y. Tomita, K. Matyash, R. Schneider and F. Taccogna, "Self-consistent simulations of the plasma-wall transition layer", *Contributions to Plasma Physics* **48** (2008), 121-125.
- D. Tskhakaya jr., "The particle-in-cell method". In: H. Fehske, R. Schneider, A. Weiße: *Computational Many Particle Physics. Lecture Notes in Physics 739*, p. 161-189. Springer Berlin/Heidelberg 2008.
- D.D. Tskhakaya sr., H. Eshraghi, "On the theory of magneto-sound double simple waves." *Journal of Plasma Physics* **74** (2008) 455-471.
- M. Volwerk, A.T.Y. Lui, M. Lester, Z. Vörös, et al. , "Magnetotail dipolarization and associated current systems observed by Cluster and Double Star". *Journal of Geophysical Research - Space Physics* **113** (2008) A08S90.
- Z. Vörös, T.L. Zhang, M.P. Leubner, M. Volwerk, M. Delva, W. Baumjohann, K. Kudela, "Magnetic fluctuations and turbulence in the Venus magnetosheath and wake", *Geophysical Research Letters* **35** (2008) L11102.
- P.C. de Vries. E. Joffrin, N.C. Hawkes et al., "Effect of toroidal field ripple on the formation of internal transport barriers." *Plasma Phys. Control. Fusion* **50** (2008) 065008.

Weitere Publikationen

In den frühen Jahren zwischen 1950 und 1970 wurden an der Universität Innsbruck viele Forschungsarbeiten der Physik in Form von unveröffentlichten internen Berichten ("Reports") dokumentiert. Diese sind heute leider zum Teil nicht mehr archiviert und vergriffen.

Ein Überblick über alle Forschungsdokumente aus dieser Zeit ist erhalten durch den Report *"17 Years Plasma Physics in Innsbruck"*, by Ferdinand Cap, UNICP Scientific Report No. 100, 15. September 1973, Institute for Theoretical Physics, Innsbruck University.

Dieser historisch interessante Bericht ist in Kapitel 7 original reproduziert.

Begutachtete Publikationen und alle Dissertationen aus dem der Plasmaphysik nahe stehenden und in einem gemeinsamen Forschungsschwerpunkt verbundenen Bereich der Ionenphysik an der Universität Innsbruck sind zusammengestellt in der Festschrift "40 Jahre Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik", A. Bacher und T.D. Märk (Hg.), Innsbruck University Press 2007.

Das vorliegende Buch zu "50 Jahre Plasmaphysik und Fusionsforschung in Innsbruck" ist in elektronischer Form mit farbigen Abbildungen unter www.plasmaphysik.at zu finden.

Die Anfangsjahre der Plasmaphysik in Innsbruck wurden sogar in einem "heiteren Schlüsselroman" (Zitat: Prof. Hannspeter Winter 2004 in seiner Laudatio zum Festkolloquium anlässlich des 80. Geburtstags von Prof. Ferdinand Cap) von Dr. Jürgen Weil frei verarbeitet. Darin über das Fusionsplasma:

"... die Schwierigkeit, dieses instabile, launenhafte, weibische Ding beisammenzuhalten, diesen Sack voll Flöhe zur höchsten Potenz - diese Schwierigkeit war zur Zeit, als Fridolin in Arnsbrück begann, schon bekannt und ist, obwohl man schon viel weitergekommen ist, auch heute noch im wesentlichen ungelöst.... damals konnte man freilich noch hoffen, durch irgendeinen isolierten Geniestreich, durch eine Mischung von Glück und Geist, das Problem ein für alle Mal zu erledigen, etwas, worüber man heutzutage, nachdem man unendlich viel mehr weiss und tausende Holzwege und Sackgassen in alle Richtungen abgeschritten ist, nur lachen kann, so wie ein Molekularbiologe unserer Tage über die Krestheorien des Mittelalters lachen mag."

Jürgen W. Weil: Fridolin und die Bombe, oder wie der Astronphysiker Orel lernte, das Leben zu lieben. Roman (Gebundene Ausgabe). Edition Atelier, Wien, 1987 (vergriffen)

6.2 Bücher

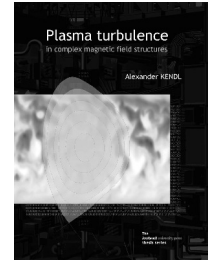
Alexander Kendl, Sabine Schindler (Hg.):

Introduction to Computer Science and Applied Computing.

Innsbruck University Press, 2008. ISBN 978-3-902571-45-8.

Ferdinand Cap: **Wie wird man 130 Jahre alt? Der Mensch als**

Wesen der Natur. *Verlag Böhlau, 2008. ISBN: 978-3205782025.*



Alexander Kendl: **Plasma Turbulence in complex magnetic field structures**

Innsbruck University Press, 2007. ISBN978-3-902571-17-5.

A. Bacher, T.D. Märk (Hg.): **40 Jahre Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik**

Innsbruck University Press, 2007. ISBN: 978-3-902571-30-4.

Ferdinand Cap: **Tsunamis and Hurricans: A mathematical approach**

Springer, 2006. ISBN 3-211-33158-1.

Ferdinand Cap: **Glaube und Religion aus der Sicht eines Naturwissenschaftlers**

Lit Verlag, 2006. ISBN-13: 978-3825895273

N. Kaiser, H.K. Pulker (Hg.): **Optical Interference Coatings**

Springer, Berlin, 2003. ISBN: 978-3540003649.

Ferdinand Cap: **Mathematical Methods in Physics and Engineering with Mathematica**

CRC Press, 2003. ISBN: 1584884029.

Ferdinand Cap: **Ein Ende der Religionen?**

Studien Verlag, Innsbruck, 2003. ISBN: 3706518813.

A.A. Harms, K.F. Schöpf, D.R. Kingdon, G.H. Miley: **Principles of Fusion Energy:**

An Introduction to Fusion Energy for Students of Science and Engineering

World Scientific Publishing, 2000. ISBN: 9810243359.

Hans Binder, Heinrich Bodner, Ferdinand Cap (Hg.):

Macht und Ohnmacht des Aberglaubens. Magie - Wissenschaft - Pseudowissenschaft

Hohe Warte, 1992. ISBN: 3882023430

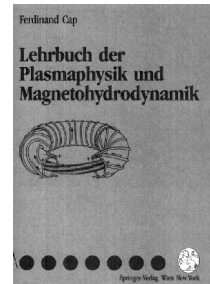
Hans K. Pulker: **Coatings on Glass**

Elsevier, Amsterdam, 1984; 2nd Re. Ed., Elsevier, Amsterdam, 1999. ISBN: 0-444-50103-7

Ferdinand Cap: **Wie löst man Randwertprobleme in Physik und Technik**
Gruyter. 1998. ISBN:3110129981

S. Kuhn and T.D. Rognlien (Hg.):
Proceedings of the Edge Plasma Theory and Simulation Workshop 1998.
 Czechoslovak Journal of Physics, Institute of Physics Acad. Sci. CR 1999.

Ferdinand Cap:
Lehrbuch der Plasmaphysik und Magnetohydrodynamik.
Springer, Wien. 1994. ISBN: 3211825703



Siegbert Kuhn, Klaus Schöpf, Roman Schrittwieser (Hg.):
Current Research on Fusion, Laboratory and Astrophysical Plasmas.
World Scientific 1993, ISBN:9810214332.

Roman Schrittwieser (Hg.): **Fourth Symposium on Double Layers
 and Other Nonlinear Potential Structures in Plasmas.**
World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 1993. ISBN-13: 978-9810214326.

Roman Schrittwieser (Hg.): **Current Driven Electrostatic Ion Cyclotron Instability:
 Proceedings of the Workshop on the Current Driven Electrostatic Ion Cyclotron.**
World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 1988. ISBN-13: 978-9971506148.

Arthur March, Ferdinand Cap: **Die physikalische Erkenntnis und ihre Grenzen**
Vieweg, Wiesbaden. 1985. ISBN: 3528071087.

Ferdinand Cap: **Handbook on Plasma Instabilities (Vols. I, II, III)**
Academic Press. 1976 / 1978 / 1982

Ferdinand Cap, Klaus Schöpf: **Energieversorgung**
Teubner, Stuttgart. 1981. ISBN: 3519032104

Ferdinand Cap: **Einführung in die Plasmaphysik (Vols. I, II, III)**
Vieweg, Wiesbaden. 1972. ISBN: 3528068035

Ferdinand Cap: **Physik greifbereit. Definitionen - Gesetze - Theorien.**
Akademie Verlag, Berlin. 1972.

Ferdinand Cap: **Physik und Technik der Atomreaktoren**
Springer, Wien. 1957. ISBN: 3211804374

6.3 Dissertationen 1958-2008 in Innsbruck in Plasmaphysik und Fusionsforschung

Zusammenstellung: A. Kendl.

Quelle: Österreichische Nationalbibliothek (Online-Katalog www.onb.ac.at)

- 1960 E. Hofinger: Ueber stationaere Potentialstroemungen in der Hydromagnetik
- 1961 R. Hommel: Der Crocco'sche Wirbelsatz in der Magnetogasdynamik
- 1961 G. Kerer: Die eindimensionale-quasistationäre Lösung der magnetohydrodynamischen Grundgleichungen fuer endliche elektrische Leitfähigkeit.
- 1962 H. Pulker: Untersuchung der optischen Eigenschaften von SiO-Aufdampfschichten und von verschieden stark oxydierten Siliziumschichten zwischen Si und SiO₂.
- 1964 I.W. Steinacker: Ableitung der eindimensionalen instationären magnetohydrodynamischen Plasmagleichungen unter Berücksichtigung von Reibung, Wärmeleitung und Leitfähigkeit und ihre Behandlung nach der Methode der Ähnlichkeits-transformation von K. Bechert.
- 1965 R. Skarics: Die Verwendung von Methoden der Gasdynamik fuer die Konstruktion von magnetogasdynamischen Strömungsbildern.
- 1965 F. Laußermair: Eine iterative Methode zur Behandlung der energieabhängigen Transportgleichung.
- 1966 H. Friedel: Lösung der magnetogasdynamischen Grundgleichungen für ein Plasma beliebiger magnetischer Reynoldszahl.
- 1966 F. Herrnegger: Herleitung des Variationsproblems der eindimensionalen instationären idealen transversalen magnetogasdynamischen Strömungen und dessen Lösung mit Hilfe der Ritz-Methode.
- 1966 K. Welzl-Müller: Über die Verwendung von Variationsverfahren in der Magnetogasdynamik.
- 1966 K. Lackner: Zweidimensionale magnetogasdynamische Strömungen kleiner magnetischer Reynoldszahl.
- 1967 H.G. Falser: Untersuchung von ebenen Plasmaströmungen hoher elektrischer Leitfähigkeit im Rahmen der linearisierten Magnetogasdynamik.
- 1968 H. Bresgen: Zweidimensionale Untersuchungen von MHD-Generatoren unter Berücksichtigung des Halleffektes und Ionenschlupfes.

- 1969 D. Floriani: Anwendung von Ähnlichkeitstransformationen auf Kanalströmungen der Magnetogasdynamik.
- 1970 R. Glätzle: Herstellung plasmagespritzter Wolframschichten, ihre Eigenschaften mit und ohne thermische Nachbehandlung.
- 1970 E.H. Jager: Untersuchungen über das Stabilitätsverhalten dissipativer Plasmaströmungen.
- 1970 F. Lintner: Lösung der partiellen Integrodifferentialgleichung von Boltzmann mit Hilfe der Legendre-Polynome.
- 1971 G. Auer: Driftwellen in einem Plasma mit Dichtegradienten.
- 1971 N. Klaus: Über die Verwendbarkeit einer Duoplasmatronionenquelle bei einem elektromagnetischen Massentrenner.
- 1972 W. Lindinger: Massenspektrometrische Untersuchungen am Plasma des negativen Glimmlichtes einer zylindrischen Hohlkathode.
- 1972 S. Kuhn: Eine numerische Methode zur Untersuchung hochfrequenter Mikroinstabilitäten in beliebigen Fusionsplasmen.
- 1972 P. Fritzer: Simultane numerische Berechnung zweidimensionaler MHD-Strömungen.
- 1972 W. Lindinger: Massenspektrometrische Untersuchungen am Plasma des negativen Glimmlichtes einer zylindrischen Hohlkathode.
- 1972 F.W. Würndle: Berechnung des Elektronentemperaturanstieges und der Ionisationsrelaxation im Einlaufbereich eines Nichtgleichgewichts-MHD-Generators unter Berücks. von Ionisations- und Anregungsmechanismen einschließlich Atom-Atom-Stößen.
- 1973 F.J. Sellmeier: Parametrische Stabilisierung und Erregung eines gedämpften Pendels großer Amplitude als Modell für ein parametrisch erregtes Plasma.
- 1973 H. Helm: Experimentelle und theoretische Untersuchungen im Fallraum und an der Kathode einer zylindrischen Hohlkathodenglimmentladung.
- 1973 J. Schmid: Ebene nichtlineare Wellen in einem warmen, schwach dissipativen Plasma.
- 1973 W. Stemberger: Über die Neukonstruktion der Innsbrucker Q-Maschine und die Bestimmung ihrer Ladungsträgerverluste.
- 1974 N. Schwaighofer: Experimentelle Untersuchungen von Temperatur und Energie der Plasmakomponenten in der neu aufgebauten Innsbrucker Q-Maschine.
- 1975 M. Leubner: Die irdische Magnetopause unter Berücksichtigung einer Winkelverteilung der solaren Teilchen und des interplanetaren Magnetfeldes.

- 1975 F. Handle: Untersuchung der Reaktionskinetik im Plasma des negativen Glimmlichtes einer zylindrischen Hohlkathode mit Hilfe eines Massenspektrometers.
- 1976 C. Leubner: Intensitätsabhängige Korrekturen zum Thomson-Streuquerschnitt und Folgerungen für die Plasmadiagnostik.
- 1976 K. Hirsch: Ausbreitungseigenschaften stationärer Elektronenplasmawellen in Abhängigkeit von ihrer Amplitude.
- 1977 H. Störi: Untersuchungen über den Zünd- und Aufbaumechanismus der zylindrischen Hohlkathodenentladung.
- 1977 R. Ramberger: Optimierung des Stromlinienverlaufes in MHD-Generatoren mit Hilfe variabler Elektrodenleitfähigkeit.
- 1977 F.P. Stössel: MHD-Modelle der Magnetopause mit Winkelverteilung der einfallenden Teilchen für den geneigten Dipol und mit Tail-Feld.
- 1977 P. Holzmann: Experimentelle Untersuchung der schnellen Elektronen aus einer stationären zylindrischen Hohlkathodenentladung in Argon.
- 1979 V. Gieseke: Untersuchung differentieller Energieverteilungen von positiven Ionen aus dem negativen Glimmlicht einer zylindrischen Hohlkathodenentladung.
- 1979 G. Ritter: Entwicklung und Erprobung eines doppelfokussierenden, statischen, axialsymmetrischen Massenspektrometers.
- 1979 M. Grössl: Raumfeste Abklingplasmen in hochreinem Argon und Krypton: Aufbau einer Apparatur und Untersuchung der Elementarprozesse atomarer und molekularer Edelgasionen.
- 1979 I. Kuen: Untersuchungen zur Kinetik positiver und negativer Ionen in einer stationären Hohlkathodenentladung.
- 1980 M. Langenwaller: Massenspektrometrische Diagnostik raumfest abklingender Plasmen in Helium, Argon und Krypton.
- 1980 S. Zygelman: Trapped-particle Instability in a toroidal confinement system with a ripple magnetic field.
- 1980 J. Edenstrasser: Untersuchung der bei der Beschreibung symmetrischer MHD-Gleichgewichte auftretenden Willkürlichkeit zweier Flußfunktionen.
- 1980 G. Strasser: Brennstoffdynamik eines hybriden Fusions-Fissionsbrüters.
- 1981 E. Mravlag: Untersuchungen zum zeitlichen Anwachsen einer niederfrequenten Instabilität großer Amplitude in einer Ein-Emitter-Q-Maschine.

- 1981 R. Blankenhorn: Die Abhängigkeit der MHD-Energiewandlung mit Verbrennungsgasen von der turbulenten Grenzschichtströmung des Kanals.
- 1981 M. Oertl: Einfluß von Gitterpotentialen in einem ruhigen Plasma auf die Energieverteilung der Ionen.
- 1984 L. Lerch: Räumliche Plasmawellenechos in zylindrischen Plasmen.
- 1985 N. Schupfer: Axialsymmetrische elektromagnetische Eigenschwingungen von plasmagefüllten toroidalen Resonatoren.
- 1987 R. Richter: Schwarmexperimente zu Ionen-Molekül-Reaktionen mit Relevanz für Ätz- und Synthesplasmen.
- 1988 E.R. Hensler: Coulombwechselwirkung im magnetisierten Plasma.
- 1990 M. Hörhager: Lineare und schwach nichtlineare Theorie von Plasmaschwingungen in der Pierce Diode.
- 1993 H. Pedit: Kinetische Modellierung zweidimensional begrenzter, stoßfreier Plasmasysteme.
- 1994 P. Spanel: Experimentelle Studien zum Reaktionsprozess in ionisierten Gasen bei thermischen Energien mittels SIFT- und FALP-Techniken.
- 1994 T. Hladschik: Reaktorphysikalische Untersuchungen zur ITER-Fusionsdynamik.
- 1994 H.A. Werthmann: Zur Effizienz der Ionen-Bernstein-Wellen-Heizung von Fusionsplasmen.
- 1995 H. Maier: Ein $(1d,2v)$ Q-Maschinenmodell unter Berücksichtigung von symmetrischen Umladungsstößen und elastischen Elektronenstößen.
- 1995 N. Jelic: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Plasmaparameter bei Anwesenheit von lokalisierten Raumladungsschichten und Doppelschichten.
- 1996 M. Winter: Experimentelle und numerische Untersuchung von nichtlinearen Effekten in einer dissipativen Alkaliplasmadiode.
- 1996 M.M. Kassab: Näherungsweise Entwicklung vielfacher Zeitskalenableitungen angewandt auf Plasmatransport und Relaxationstheorien.
- 1997 A. Lagg: Energiereiche Teilchen in der inneren Jupiter-Magnetosphäre: Simulation und Ergebnisse des EPD-Experimentes an Bord der Raumsonde Galileo.
- 1998 F. Mairey: Kinetische Untersuchung von Ionisation und Rekombination in begrenzten Plasmen.

- 1999 D. Strele: Effect of C60 Anions on the potential relaxation instability and the ion heating by the inhomogeneous energy density driven instability in a Q-Machine plasma.
- 2002 A. Qayyum: Reaktive Wechselwirkung von einfach und doppelt geladenen Molekuelionen mit in Fusionphysik relevanten Oberflaechen.
- 2003 R. Khanal: Ein Kinetisches Trajektorien-simulations-Modell für begrenzte Plasmen.
- 2004 W. Schustereder: Analysis of plasmas and nanoparticles.
- 2004 P. Balan: Experimental investigations of the edge region of magnetized fusion plasmas.
- 2005 T. Tepnual: Ion surface reaction studies by tandem mass spectrometry.
- 2006 M. Janda: The Study of plasma induced chemistry in gaseous mixture N₂-CO₂-H₂O.
- 2006 L. Feketeova: Reactive interactions of singly and doubly charged molecular ions with various surfaces relevant for fusion technologie.
- 2008 D. Huber: Untersuchung des Plasmas im Reaktiven Niederspannungs-Ionenplattier-Prozess bei der Herstellung von Metall-Oxid-Schichten.

6.4 Laufende Doktorarbeiten 2008

- Abid Aleem (P. Scheier): Development of a gas cluster ion beam source based on plasma discharges
- F. Bint-e-Munir (S. Kuhn): Comprehensive analytical treatment of the magnetised plasma-wall transition
- B.H. Cho (K. Schöpf): Flux surface shape effects on fast ion trajectories in toroidal magnetic configurations
- A. Din (S. Kuhn): Kinetic theory of emissive probes
- N. Endstrasser (P. Scheier): Determination of electron impact cross-sections for small hydrocarbons interacting with fusion-relevant surfaces

- T. Gassner (K. Schöpf): Synergetic effects on fast ion distribution in tokamak plasmas
- A. Hallbauer (H. Pulker): Herstellung und Charakterisierung von ionenplattierten Nb₂O₅- und HfO₂-Schichten
- M. Kamran (S. Kuhn): Tonks-Langmuir model with a spatially varying ion polytropic coefficient
- S. Konzett (A. Kendl): Extended computation of edge plasma turbulence
- D. Kupelwieser (S. Kuhn): Extended variational principle for tokamak plasmas
- M. Khan (K. Schöpf): Resonant fast ion transport in tokamak plasmas
- C. Maszl (R. Schrittwieser): Experimental investigations of edge plasma turbulence in linear and toroidal devices
- A. Mauracher (M. Probst): Theoretical and experimental investigations of electron attachment to biomolecules
- A. Murawski (H. Pulker): Untersuchung eines Flammplasmas
- B. Rasul (P. Scheier): Ion surface collisions for the investigation of fusion relevant Tungsten, Beryllium and Carbon surfaces
- S. Schlichtherle (H. Pulker): Untersuchung gepulster ionenunterstützter Beschichtungsprozesse
- A. Schneider (S. Kuhn): Comprehensive analytical description of the unmagnetised plasma-wall transition, with particular emphasis on the intermediate region
- J. Seebacher (S. Kuhn): Consistent kinetic trace impurity transport and chemistry modelling in fusion plasmas
- G. Strauss (H. Pulker): Plasma analysis of different ion and plasma assisted PVD-processes

7

Nachdruck des Scientific Report No. 100
"17 Years Plasma Physics in Innsbruck"
aus dem Jahr 1973

SCIENTIFIC REPORT No. 100

17 Years Plasma Physics in Innsbruck
by

Ferdinand Cap

UNICP - SR 100 15 September 1973

Includes a complete bibliography
1957 - 1973

Responsible editors: F. Cap, R. Schrittwieser, Institute
for Theoretical Physics,
University of Innsbruck, Austria

Reproduced by: Institute for Theoretical Physics,
Innsbruck University,
A - 6020 Innsbruck, Austria.

- 1 -

ABSTRACT AND CONTENTS

In this report the results of 17 years (1957 - 1973) of research in Magnetohydrodynamics and Plasma Physics are summarized and reviewed. It also covers a summary lecture held by F. Cap in Jülich, Germany, Plasma Physics Institute of the Kernforschungsanlage Jülich on 14 September 1973. It covers

1. MHD - Theory of Ideal Plasma
2. MHD - Theory of a Finite Conductive Plasma
3. MHD - Channel Flow and Accelerators
4. MHD - Waves, Shocks, Characteristics
5. MHD - Instabilities
6. Mathematical Methods
7. Vlasov - Plasmas and Echoes
8. Microinstabilities
9. Experimental Plasma Physics
10. Space Plasmas
11. Present Staff
12. References and Bibliography

- 2 -

PREFACE

The publication of a Scientific Report Nr. 100 within the frame of a research project might be an appropriate time to review and summarize the past activity. Furthermore, many participants of the International Congress on Waves and Instabilities in Plasmas, Innsbruck, April 2 - 7, 1973 expressed their wish to be informed on the history of plasma physics research in Innsbruck and the Directors of the Plasma Physics Institute in Jülich, Germany, invited the author to give in Jülich a Summary Lecture on Plasma Physics in Innsbruck on 14 September 1973.

During World War II the author was engaged in gasdynamic research [1] - [7] and when the war was over he worked in the fields of elementary particle and nuclear physics [8] - [34], in general relativity [35] - [38], and in mathematical methods of theoretical physics etc. [39] - [49]. In summer 1956 the author had the privilege to meet W. B. Thompson, at this time in Harwell, (the Culham Laboratory was not yet in existence) who attracted the author's interest to magnetohydrodynamics.

At this time it was quite a venture to start [60] a new field

- 3 -

at Innsbruck University. The Institute of theoretical Physics had a staff of 2 and the yearly total budget was approximately US \$ 150.- so that only 3 periodicals could be subscribed (Nuovo Cimento, Physical Review, Progress theor. Phys.) and some 15 - 20 books could be bought per year. No plasma physics periodicals were in existence and the publication in e.g. Acta Physica Austriaca needed more than one year [50] [60].

Optimistic by nature and charged in 1957 to take the professorship for theoretical physics at the University of Innsbruck, the author started and what resulted is reported here.

It was only with the support of a US - Government Research Contract (1963), later with the support of the Austrian Scientific Research Council (1968), the Austrian Ministry of Technology (1967), the Austrian Technological Research Council (1968) and the Austrian Academy of Sciences (1971), that the necessary funds were received to carry through the research described herein. The support given by the Garching, Jülich, Culham Centers and by other scientists will be mentioned in the appropriate chapters.

- 4 -

1. MHD - Theory of Ideal Plasmas.

After a certain time of learning we started to investigate the question, in how far the gasdynamical methods using characteristics could be used to solve magnetohydrodynamic problems. Since many gasdynamic problems are investigated under the assumption that the flow is a potential flow it was of interest to understand under what condition potential flow in magnetogasdynamics can occur [50], [52], [57], [60]. It was shown that an analog to Crocco's theorem in gasdynamics exists in magnetogasdynamics and that certain thermodynamic and mechanic relations must be satisfied in order that a potential flow may occur [51], [53], [61]. It was shown that only twodimensional flow problems could be a potential flow and several practical examples using characteristics methods were solved, [54], [55], [56]. Also non-stationary onedimensional problems where the flow may always be considered to be a potential flow were investigated [58], [59], [62]. Also variational principles have been used to solve stationary [63] and non-stationary potential flows of MGD [64] [62]. According to a suggestion by W. B. Thompson, the equivalence between a special form

- 5 -

of a rigid wall, a boundary value problem, and a special exterior magnetic field simulating the form of the wall, was investigated with low success [65], [66], [68]. Since real plasmas do not have infinite electrical conductivity, research started on plasmas with finite conductivity.

2. MHD - Theory of a Finite Conductive Plasma.

First of all, we tried to understand the physical and mathematical differences between ideal and real plasmas. When a physical parameter which was assumed to be infinite now has to be assumed to be big, but finite it is custom to start theories with series developments with respect to powers of the inverse of the big parameter. So we first tried to solve the MGD equations of a real plasma by series expansions with respect to powers of resistivity [59]. Having obtained some useful equations we started numerical investigations [67], [68], [70], [71], [72], [73].

In another attempt we tried to find an analytical solution for twodimensional flows of a conductive compressible medium. We arrived at the Tricomi equation, [74]. Flows of

- 6 -

finite conductive plasmas as e.g. in an accelerator were also treated, see chapter 3 [75].

In all flow problems, boundary layer problems are of importance. So also in plasma physics, where two, even three different boundary layers -viscous, magnetic, thermal - exist. So it was important for us to investigate plasma boundary layer problems. In [76] a viscous channel flow in boundary layer approximation with heat conduction was investigated using similarity transformations, see also chapter 6. Quite another approach - by solving analytically complicated nonlinear partial differential equations describing the boundary layer may be found in [77], [78].

Simple waves and shocks are basic phenomena. If one understands them, one can learn for more complicated problems. So the influence of finite electrical conductivity on the classical MGD shocks was investigated. A relation between shock thickness and electrical conductivity was found [79], [67], [80] see also [72]. Going deeper into this problem it was recognized that finite conductivity plays a special part in the manner with which discontinuities develop in a plasma. This is the basic reason for the different

- 7 -

behavior of ideal and real plasmas - a paper in Journal of Mathematical Physics gives a deeper insight [81], [82], see also chapter 4.

3. MHD - Channel Flow and Accelerators.

The various methods worked out by our group for MHD flows of a plasma exhibiting a finite electrical conductivity were tested on practical examples. So first the twodimensional stationary and then the onedimensional non-stationary flow at small magnetic Reynoldsnumbers was calculated on a computer [70], [69], [72], [73]. Then the methods were applied to the calculation of different types of plasma accelerator, including travelling wave accelerators [83], [84], [85], [86], [75], [87].

Later on a quite extensive programme on numerical studies on MHD power generating channels was started. First, two-dimensional investigations for single electrode pairs and for periodic electrode pairs were made on the Hall effect and the ion slip. Several papers were published: [88], [89], [90], [91]. Then, a more broad programme to investigate theoretical problems in the technological realisation

- 8 -

of MHD power production was started. Preliminary results can be found [92]; analytical solutions of channel flow problems may be found in [93], [94], [76], [95], [96]. Later, attempts were made to understand and calculate the degree of efficiency and of energy conversion in a MHD channel: [97]. We then concentrated on the question of plasma - wall heat transfer in MGD generators, published in [98]. On the basis of this work a collaboration with M. Lengyel, Brederlow, K. Witter and Witkowsky from the Garching Plasma Physics Center developed. The support given to us in the form of the availability of the Garching IBM 360/91 computer is gratefully acknowledged. P. Fritzer calculated numerically the current and density distribution in a two-dimensional MGD flow of a working gas with variable properties including heat transfer, Hall effect and segmented electrodes [99], [100], [101], [105] and F. Woerndle made numerical computations on the influence of ionization and excitation mechanisms including atom - atom collisions upon a non equilibrium MGD entrance flow. This work was supported not only by Garching, but also by R. Bohn, ARGUS project, Jülich, Germany [102], [103]. Finally, starting from the old idea of electrodes with

- 9 -

stepwise varying electric conductivity (segmented electrodes) investigations were made how a given continuously varying electric conductivity in extended twodimensional electrodes influences the current density field line pattern and therefore influences the electrode heating and corrosion problems. After some preliminary but interesting results [106], [107] we now hope to be able to predict optimum distributions of the electric conductivity along and across thick electrodes so that the corrosion due to Joule heating is a minimum. We are happy to have the - just starting - collaboration of Prof. Haines, London, Prof. laing and Prof. J. C.Tayler both from Glasgow.

In the frame of our work on practical applications of mathematical methods for the solution of MGD problems for a real plasma also some work on plasma explosions in an inhomogeneous magnetic field was done [108], [109], [110].

4. MHD - Waves, Shocks, Characteristics.

In order to understand the difference in the behavior of ideal and real plasmas we quite early started to investigate small waves and characteristics in real plasmas [111]

- 10 -

and shock waves [80], [112]. Then the characteristic curves of the system of partial differential equations describing real plasma flow were derived and found to be complex due to the magnetic diffusion [113], [114], [115], [81], [80]. The paper by Friedl [81] gave a break through in understanding and helped to develop a new mathematical characteristics method to solve such problems [72]. Some first remarks on all these problems are given in Volume 3 of my book on plasma physics [116].

5. MHD - Instabilities.

Having been interested some time in plasma instabilities we later took up the suggestion made by Dr. Georges Samaras from the US Government Research Office to investigate instabilities. To learn we started in 1965 Literature surveys on plasma instabilities which were continued up to 1973: [117]. We have produced more than 5500 abstracts on more than 150 instabilities.

Later on we started own research on plasmainstabilities. First we were mainly concerned with MHD instabilities, with macroscopic instabilities. Herrnegger investigated the

- 11 -

Helmholtz instability in a discontinuous magnetic field [118], [119] and reported in Stockholm on his results. The influence of finite electrical resistivity alone and combined with viscosity on stationary magnetostatic equilibria was investigated by H. Friedel and P. Unteregger. Reports were given at the Novosibirsk Conference 1968 [120] [121] [122]. A general algorithm to investigate plasma MHD instabilities using Lie series was worked out by Floriani and published in Nuclear Fusion [123][124]. The effects of gradients of electric resistivity and the generation of overstable modes by this effect were investigated by Herrnegger [125][126]. Also instabilities of flowing plasmas have been investigated in Innsbruck. So. E. Jager wrote some papers on dissipative instabilities of an MHD sheet flow [127][128]. Furthermore the magnetohydrodynamic Poiseuille flow and its stability was investigated by Jager [129], who reported also on his findings at the occasion of the Innsbruck Congress on Waves and instabilities in plasmas in April this year [130]. Resistive drift waves for adiabatic plasmas - all other authors had investigated isothermal plasmas - were the subject of research of Gerhard Auer who reported on the results at the Paris Quiescent Plasma

- 12 -

Conference [131], [132], [133].

The concept of local potential was also used in Innsbruck to carry through nonlinear stability investigations [134], [135]. The theory of nonlinear waves and the question if added nonlinear terms might destabilize stable linear systems was investigated in a series of papers, [136], [137]. A special problem, namely amplitude dispersion for dissipative waves, i. e. the dependence of the dispersion relation on the amplitude for strongly nonlinear weakly dissipative waves will be treated in a special seminar on 14 September 1973 at the Jülich Plasma Physics Theory Seminar [138]. The main ideas are published in J. Mathematical Physics [139].

It is well known that finite Larmor radius effects have a stabilizing action. Also in Innsbruck this action was investigated: Herrnegger tested the effects of collision and gyroviscosity on the gravitational instability in a two component plasma [140] [141] [142]. Due to the support given to our group by Prof. Fünfer, Garching. Mr. Herrnegger was able to work in Garching for two years. He there produced several papers mainly on the equilibrium and the stability

- 13 -

of the belt pinch [143].

Parametric effects may destabilize or stabilize a plasma. Such parametric effects are therefore of interest. The Langevin Equation of an electron in a collisional plasma under the influence of an electromagnetic wave has the same form as the equation of a weakly damped inverted pendulum whose support is oscillated. To understand the mechanism of nonlinear parametric stabilization the equations of the inverted and parametrically excited pendulum was solved by Mr. Sellmeier [144]. It was shown that for big amplitudes new equilibria are possible. Nonlinear effects play also an important role in stabilization. If the amplitude grows, nonlinear terms in the differential equations might stabilize, possibly but not necessarily by damping but also by other effects.

So a collaboration between Prof. Herbert Lashinsky, University of Maryland, College Park, and author showed that convection phenomena of the Benard problem could be stabilized by nonlinear terms [145] [146]. Then it was investigated if the same non linear terms could stabilize also the oscillatory solution of the Lashinsky-Cap equation

- 14 -

[147] and then a more systematic investigation on the effects of nonlinear damping terms of 3rd degree and with a first derivative and its powers and restoring forces up to the third power were investigated.

More details on plasma instabilities might also be found in the books on plasma instabilities [149].

We also should mention the International Congress on Waves and Instabilities in Plasmas organized by the Innsbruck group in April 1973. Here the support of Professors Lehner and Vandenplaas should be acknowledged [150]. In concluding this chapter we should mention our collaboration with Prof. Boyd and Dr. Gardner from Bangor University, Wales. Dr. Gardner will stay in Innsbruck in October - November 1973 to investigate Tokamak and belt pinch instabilities. We are also negotiating with Prof. Allis from MIT to stay with us in the academic year 1974/75.

6. Mathematical Methods.

When a group of theoreticians is working on new problems then inevitably problems of new mathematical status arise.

- 15 -

Four topics might be worthwhile to mention.

In order to find analytical solutions of channel flow problems of real plasmas the so called similarity transformations which transform a partial differential equation into an ordinary differential equation were investigated [151] and applied [76][96].

Another topic was to find a new method to solve strongly nonlinear ordinary differentialequations which possess nearly periodic solutions. On the lines of the Kryolov - Bogoljubow method an averaging method to solve such strongly nonlinear weakly dissipative equations using Jacobi elliptic functions with slowly time varying modulus was devised and applied [153].

Another idea was to transform dissipative terms into time dependent coefficients. A quite general transformation was found which is able to transform nonlinear damping terms into linear time dependent terms [154].

The paper using Jacobi elliptic functions to solve the equation of the parametrically excited pendulum with big amplitudes has been mentioned before [144].

- 16 -

7. Vlasov Plasmas and Echoes.

Turning now to Microinstabilities we first investigated possibilities to solve analytically the Vlasov equation. The results were quite meager, though we were able to find some closed analytical solutions for very special cases [155][156]. The solutions of the Langevin equation of motion of an electron in a collisional plasma under the influence of an electromagnetic wave gives the solution of the characteristic equation of a certain class of collisional kinetic equations and is then connected with nonlinear collisional Landau damping [157][158]. P. Koch, now Paris, investigated in Innsbruck turbulent plasmas [159] and L. Lerch started, in collaboration with the Berlin group (Baumgärtel, Sauer etc) to investigate collisional plasma echoes in bounded plasmas [160]. Other plans for international collaboration with a theoretician from Culham are under way. P. Shukla produced several papers on test particles in Innsbruck [161], [162].

8. Microinstabilities.

In this field our results are very scarce and concentrate

- 17 -

around the name of S. Kuhn. Extending a paper by Hastie and Taylor he was able to give a method to find plasma equilibria in arbitrary geometries and to give stability criteria for high frequency oscillations in a collisionless plasma of arbitrary geometric configuration [163][164][149]. A collaboration was initiated with C. Oberman, Princeton who visited Innsbruck and who invited G. Auer for a year (Sept. 73 - Aug 74) to Princeton.

9. Experimental plasma physics.

Having been 1967 half year guest Professor for plasma physics at the City University in New York, Prof. Jen from City gave us the privilege to come in exchange to Innsbruck in 1969. This guest - professorship was the starting point for our experimental programme [165]. We built a Q-machine and started to understand and to handle the machine. Many basic parameters of the machine and their interdependence were measured [166]. Details of the Innsbruck Q-machine are described in [167]. During all this time the advice of Professors Varney and Kunkel who stayed both as guest professors in Innsbruck (1971/72 resp. 1972/73) were very

- 18 -

useful. From this month, September 1973 we appreciate the collaboration of P. Sugai from Japan, who worked there on a Q-machine. Our programme at present comprises the heating of plasmas by kHz modulated carrierwaves of MHz to produce harmonically varying temperature in the plasma and to test linear and nonlinear parametric temperature effects. The experiments are in due course.

Other experiments were made on a hollow cathode which exhibited strange oscillations [168][169].

10. Space Plasmas.

In 1971, the author had the privilege to be senior research associate at the Goddard Space FlightCenter of NASA in Greenbelt, Maryland. He was there for 10 months associated with the theory division under Dr. Ted Northrop. At the end of 1971 the Austrian Academy of Sciences decided to create an Institute for Space Research. This Institutes received also a department for Space Plasma Physics which was situated in Innsbruck.

The first space plasma contribution from Innsbruck was a

- 19 -

plasma theory of lunar magnetic fields [170][171]. Then a series of papers by P. Shukla, guest from India for half a year on plasma waves in natural plasmas followed [172][173]. Also the instability of longitudinal waves in a collisional natural magneto plasma was investigated by him [174][175].

In this year E. Märk started a research on the increase of the precipitation of radiation belt particles by increasing the density of the cold plasma. It is well known that O. Brien and Brice had suggested such experiments and it is known that the Williamson proton in nature actually do, but the Barium release experiments do not increase the particle precipitation. It was shown the precipitation condition is very sensitive from the ion mass of the plasma released [176]. According to Dr. Pease, Culham this work is of interest for mirror machines since this effect might allow to control the ion cyclotron instability - and the mirror instability.

The last problem under consideration just how is a new model for the magnetosphere. If one assumes a certain directional distribution of the particles coming from the Sun in the solar wind, then the magnetospheric boundary is

- 20 -

distorted. It seems that some observations are in better agreement with the new theory than the theory by Beard, Mead and others [177].

11. Present staff.

(October 1973)

a. MHD - channel problems and power generation:

Kuhn, Ramberger, J. C. Taylor (Glasgow) [2 months].
Collaboration with Garching, Jülich (Bohn), Glasgow
(Laing, Taylor), London (Haines, Imperial College),
Blankenhorn (Jülich), (on leave).

b. Similarity transformations:

Floriani, Rosenau (?), Cap.

c. Instabilities:

Auer (on leave in Princeton), Herrnegger (on leave
in Garching), Kuhn, Cap, Sellmeier, Holzmann, Gardner
(Bangor), Mrs. Gardner.

(Collaboration with Bangor - Boyd); possibly collaboration Culham.

- 21 -

d. Q Machine:

E. Maerk, Mravlag, Sugai (Collaboration Japan). Possibly Collaboration with Culham (Hamberger).

e. Echoes:

Lerch, S. Kuhn, Collaboration with Berlin and possibly Prague.

f. Space Plasma Physics:

M. Leubner, Stoessel, Cap, Collaboration Goddard Space Flight Center (T. Northrop hopefully 1974 here).

12. References and Bibliography.

- [1] F. C., Acta Phys. Austriaca 1, 89 - 97 (1947)
- [2] F. C., Acta Phys. Austriaca 2, 224 - 238 (1948)
- [3] F. C., Österr. Ing. Archiv 3, 97 - 106 (1949)
- [4] F. C., Helvetica Physica Acta 21, 505 - 512 (1948)
- [5] F. C., J. Chem. Phys. 17, 106 - 107 (1949)
- [6] F. C., 5th Int. Astronaut. Congress, 264 - 273,
Innsbruck 1954
- [7] F. C., Wissen der Zeit 1, Nr. 9, Nr. 11, Nr. 12 (1948)
- [8] F. C., Experientia, 6, 291 - 295 (1950)
- [9] F. C., Acta Phys. Austriaca 6, 36 - 41 (1952)
- [10] F. C., Il Nuovo Cimento 10, 1333 - 1334 (1953)
- [11] F. C., J. de Physique et le Radium 14, 213 - 214 (1953)
- [12] F. C., Acta Phys. Austriaca 8, 191 - 197 (1953)
- [13] F. C., Z. f. Naturforschung 8a, 740 - 744 - 753 (1953)
- [14] F. C., Progress theor. Phys. 10, 235 - 235 (1953)
- [15] F. C., Phys. Rev. 93, 907 - 907 (1954)
- [16] F. C., Phys. Rev. 95, 287 - 288 (1954)
- [17] F. C., Fortschritte d. Physik 2, 207 - 231 (1955)
- [18] F. C., W. G., Il Nuovo Cimento 1, (10) 1211 - 1222 (1955)
- [19] F. C., Progress theor. Phys. 13, 62 - 68 (1955)

- 23 -

- [20] F. C., Fortschritte d. Phys. 3, 371 - 407 (1955)
- [21] F. C., Fortschritte d. Phys. 4, 149 - 215 (1956)
- [22] F. C., Il Nuovo Cimento 3, (10), 418 - 432 (1956)
- [23] F. C., Annales Inst. H. Poincaré, 15, 113 - 122 (1956)
- [24] F. C., Il Nuovo Cimento, Suppl. 4, (10) 814 - 824 (1956)
- [25] F. C., Il Nuovo Cimento, Suppl. 4, (10) 807 - 812 (1956)
- [26] F. C., Physik und Technik der Atomreaktoren, Springer,
Wien 1957 (russische Übersetzung Atomisdat 1960
Moskau)
- [27] F. C., Atompraxis 4, 248 - 249 (1958)
- [28] F. C., Österr. Ing. Zeitschrift 2, 111 - 113 (1959)
- [29] F. C., Proceedings 2nd Geneva Conference of Atomic
Energy, Paper 1808, New York 1958
- [30] F. C., Nukleonik, 2, 47 - 54 (1960)
- [31] F. C., Nukleonik, 6, 141 - 147 (1964)
- [32] F. C., Acta Phys. Austriaca 19, 1 - 4 (1964)
- [33] F. C., Nukleonik 9, 242 - 244 (1967)
- [34] F. C., Nuclear Science and Eng. 26, 517 - 512 (1966)
- [35] F. C., Acta Physica Austriaca 6, 135 - 156 (1952)
- [36] F. C., 9th Intern. Astronaut. Congress, 209 - 211,
Amsterdam 1958
- [37] F. C., et al, Bull. Amer. Phys. Soc. R11 , 7 (2) 493,
(1962)

- 24 -

- [38] F. C. et al, Fortschritte d. Phys., 14, 205 - 233 (1966)
- [39] F. C., 9th Intern. Astronaut. Congress, 62 - 66,
Amsterdam 1958
- [40] F. C., W. G., Astronautica Acta 5, 287 - 312 (1959)
- [41] F. C., 11th Intern. Astronaut. Congress, 348 - 350,
Stockholm 1960.
- [42] F. C., Acta Phys. Austr., 15, 213 - 216 (1962)
- [43] F. C. et al, Nasa Reports CR - 552, 1046 (1966, 1968)
- [44] F. C., Beth Memorial Colloquium Paris 1964,
D. Reidel, Dordrecht 1968, p 97 - 101
- [45] F. C. et al, Atomic Energy Review 8, 621 - 692 (1970)
- [46] F. C., Österr. Ing. Archiv 2, 201 - 211 (1948)
- [47] F. C., Mikrochimica Acta 33, 195 - 199 (1947)
- [48] F. C., Acta Phys. Austr. 8, 346 - 355 (1954)
- [49] F. C., Annales Inst. H. Poincaré, 15, 123 - 131 (1956)
- [50] F. C., E. Hofinger, Acta Phys. Austr. 13, 262 - 264
(1960)
- [51] F. C., R. Hommel, Ann. d. Physik (7) 11, 132 - 137 (1963)
- [52] F. C., Ann. d. Physik (7) 11, 197 - 200 (1963)
- [53] F. C., Acta Phys. Austr. 19, 333 - 338 (1965)
- [54] R. Skarics, Thesis, Innsbruck 1963
- [55] F. C., Journal of Nuclear Energy C 7, 69 - 77 (1965)

- 25 -

- [56] F. C., H. Friedel, ZAMP 17, 183 - 188 (1966)
- [57] F. C., H. Friedel, Potential Flow in MGD, Report
SR 14, September 1964
- [58] G. Kerer, Unsteady MHD Flow, Report SR 5,
August 1963
- [59] G. Kerer, Thesis, Innsbruck 1961
- [60] E. Hofinger, Thesis, Innsbruck 1959 (started 1957)
- [61] R. Hommel, Thesis, Innsbruck 1961
- [62] F. C., F. Herrnegger, Acta Phys. Austr. 21, 298 - 304
(1966)
- [63] F. C., G. Mueller, ZAMP 18, 672 - 682 (1967)
G. Müller Thesis, Innsbruck 1966
- [64] F. Herrnegger, Thesis, Innsbruck 1966
- [65] F. C., G. Kerer, Interaction of field with flow, Re-
port SR 17, October 1964
- [66] F. Herrnegger, Magnetic Laval nozzle, Report SR 34,
May 1966
- [67] H. Friedel, Numerical method, Report SR 28,
July 1965
- [68] H. Friedel, Numerical treatment, Report SR 34,
June 1966

- 26 -

- [69] H. Friedel, F. Herrnegger, K. Lackner, First European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Munich, October 1966.
- [70] K. Lackner, Flow with small magnetic Reynolds numbers Report SR 25, February 1965
- [71] F. Herrnegger, Numerical results, Report SR 40, December 1966
- [72] H. Friedel, Thesis, Innsbruck 1966
- [73] K. Lackner, Thesis, Innsbruck 1966
- [74] F. C., H. Falser, ZAMP 20, 947 - 956 (1969)
Falser Thesis, Innsbruck 1967
- [75] H. Friedel, K. Lackner, Plasma Accelerators, 17th International Astronautical Congress 3, 261 - 271, Paris, Dunod, 1967
- [76] F. Cetal, Nuclear Fusion 8, 360 - 362 (1968)
- [77] H. Friedel, ZAMP 20, 329 - 342 (1969)
- [78] H. Friedel, Nonideal boundary layer, Report SR 42, March 1967
- [79] H. Friedel, Finite conductivity MHD, Report SR 24, March 1965
- [80] H. Friedel, ZAMP 18, 85 - 92 (1967)
- [81] H. Friedel, J. Mathematical Physics 8, 2234 (1967)

- 27 -

- [82] H. Friedel, Weak solutions, Report SR 20 June 1966
- [83] H. Friedel, K. Lackner, MHD - accelerators, Report
29, Dec. 1965
- [84] K. Lackner, MGD flow of small Reynolds numbers, Re-
port SR. 27, June 1965, SR 31, June 1966
- [85] H. Friedel, Travelling wave accelerators, Report SR 41,
Dec. 1966
- [86] K. Lackner, Coaxial Hall accelerator, Report SR 45,
March 1967
- [87] K. Lackner, ZAMP 19, 844 - 850 (1968)
- [88] F. C. et al, Hall effect, ion slip, end effects, Re-
port SR 55, March 1968
- [89] H. Bresgen, Acta Phys. Austr. 27, 248 - 254 (1968)
- [90] F. C., H. Bresgen, Acta Phys. Austr. 28, 65-84, (1969)
- [91] H. Bresgen, Thesis, Innsbruck 1967
- [92] F. C. et al, Semi -annual report 30 June 1967, Austri-
an Ministry of Commerce
- [93] F. C., D. Floriani, Semi -annual report 30 Sept, 1968,
Project Nr. 564, Austrian Scientific Research
Council, Report UNICP - IWA 699, March 1969
- [94] D. Floriani, Viscous MGD channel flow of real plasma,
Report UNICP - SR 58, November 1968

- 28 -

- [95] F. C., D. Floriani, P. Kaps, Elektrotechnik und Maschinenbau 86, 512 - 516 (1969)
- [96] D. Floriani, Kanalströmungsprobleme der Magnetogasdynamik, Publikationsstelle der Universität Innsbruck 1969 and Thesis, Innsbruck 1969
- [97] F. C., et al, Efficiency of MHD power generators, Report UNICP - HGA68, December 1968 and UNICP - JGA69, June 1969, Project 189 of Austrian technological Research Council
- [98] F. C. et al, Heat transfer and heat losses, Report UNICP - HGB 79, April 1970 and UNICP - JGB 70, January 1971, UNICP - HGB 71, August 1971, UNICP - JGP72, January 1972
- [99] P. Fritzer, Numerical calculations etc, Report UNICP - SR 79, August 1971
- [100] P. Fritzer, 5th International Conference on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation, Munich 19 - 23 April 1971, Proceedings 1, 143 - 147
- [101] P. Fritzer, L. Lengyel, K. Witte, 12th Symposium Engineering Aspects of MHD, Argonne, USA, 1972
- [102] F. Woerndle, Ionization and excitation etc., Report

- 29 -

UNICP - SR 78, May 1972

- [103] F. Woerndle, 5th International Conference on Magneto-hydrodynamic Electrical Power Generation, 19 - 23 April 1971, Munich, Proceedings 2, 81 - 88 (1972)
- [104] F. Woerndle, Thesis Innsbruck 1972
- [105] P. Fritzer, Thesis Innsbruck 1972
- [106] F. C., P. Fritzer, J. Schmid, Stromdichteverteilung an MHD-Elektroden, Report UNICP - HGC 72, Project o.o2/91, Vienna 1972
- [107] P. Fritzer, J. Schmid, Elektroden variabler elektrischer Leitfähigkeit, Report UNICP - HGB 72, Project o.o2/91, Vienna 1972
- [108] F. C., N. Rimer, Explosion in Ionosphere, Report SR 52, November 1967 and UNICP - SR 67, August 1969
- [109] F. C., Z. f. Flugwissenschaften 18, 98 - 100(1970)
- [110] N. Rimer, Thesis 1971, City University New York
- [111] H. Friedel, Small amplitude waves, Report SR 12, July 1964
- [112] F. C., F. Herrnegger, Shock waves, report SR 13, Sept. 1964
- [113] F. C., F. Herrnegger, Characteristics for MHD with fi-

- 30 -

- nite conductivity, Report SR 22, December 1964.
- [114] F. C., F. Herrnegger, Report SR 18, dec. 1964
- [115] H. Friedel, MHD characteristics for finite electrical conductivity.
- [116] F. Cap, Einführung in die Plasmaphysik Vol 3, Magnetohydrodynamik. Vieweg, Braunschweig 1972 (English translation, Pergamon, Oxford, 1974).
- [117] F. C. et al, Literature survey on plasma instabilities, Report SR 36, 46 October 1966, literature up to 1965, 1967, Report UNICP - FR 69 December 1969 report UNICP - SR 75 December 1970, literature 1961 - 1968,
Reports UNICP - SR 81 - 89, literature 1961 - 1970
Reports UNICP - SR 94 - 95, literature 1971
Reports UNICP - SR 96 - 97, literature 1972
- [118] F. Herrnegger, Helmholtz instability in a discontinuous magnetic field, Report SR 47, June 1967 and SR 63, December 1968.
- [119] F. Herrnegger, Plasma Physics 10, 454 (1968) - Second European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, 1967, Stockholm
- [120] H. Friedel, Electrical resistivity influence, Report

- 31 -

SR 48, July 1967

- [121] P. Unteregger, Resistive instabilities of a viscous magnetofluid, Report SR 60, November 1968
- [122] H. Friedel, P. Unteregger, Proceedings 3rd International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, August 1968, Novosibirsk, Proceedings IAEA Vienna 1969, 1, 811 - 817 (1969)
- [123] D. Floriani, General algorithm, Report SR 62, Jan. 1969
- [124] D. Floriani, Nuclear Fusion 9, 77 - 79 (1969)
- [125] F. Herrnegger, Overstable modes due to resistivity gradients, Report SR 59, March 1969.
- [126] F. Herrnegger, Proceedings 3rd European Conference on Fusion and Plasma Physics, Utrecht, 23 - 27 June 1969, p. 51.
- [127] E. Jager, Dissipative instabilities.. Report SR 65, June 1968
- [128] E. Jager, Thesis Innsbruck 1970
- [129] E. Jager, MHD Poiseuille flow, Report SR 72, Sept. 1970
- [130] E. Jager, International Congress, Waves and Instabilities on Plasmas, Innsbruck, April 1973, Supplement, Post deadline papers

- 32 -

- [131] G. Auer, Resistive drift waves in adiabatic plasmas, report SR 66, July 1969, SR 69, Dec. 1969
- [132] G. Auer, Proceedings Intern. Conference on Physics of Quiescent Plasmas, 8 - 13 Sept 1969, 2, 8 - 13 (1969)
- [133] G. Auer, Thesis, Innsbruck 1970
- [134] F. Herrnegger, Local potential and nonlinear stability, Reports SR 64, december 1969 and UNICP - SR 70, April 1970
- [135] F. Herrnegger, Proc. 4th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Frascati 31 Aug. - 4 Sept. 1970, p. 185
- [136] J. Schmid, Theory of nonlinear waves, report UNICP - SR 74, October 1970 and UNICP - SR 98, June 1973
- [137] J. Schmid, Thesis, Innsbruck
- [138] F. C., Amplitude dispersion, Report UNICP - SR 80, July 1971
- [139] F. C., J. Mathem. Phys. 13, 1126 - 1130 (1972)
- [140] F. Herrnegger, Gyroviscosity etc., report UNICP - SR 76, Dec. 1971
- [141] F. Herrnegger, J. Plasma Physics 8, 393 (1972)
- [142] F. Herrnegger, Paper C 8, International Congress on

- 33 -

waves and instabilities in plasmas, Innsbruck
April 1973

- [143] F. Herrnegger, 5th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, 21 - 25 August 1972, Grenoble, Vol 1, p. 26
- [144] F. J. Sellmeier, Thesis, Innsbruck 1973 and Report UNICP - SR 93, September 1973
- [145] F. C., H. Lashinsky, Nonlinear saturation of convection, Int. Congress on Nonlinear Mechanics, Poznan, Sept. 1972
- [146] F. C., H. Lashinsky, Vopro ky Nelineine Mekhanike 1972, accepted.
- [147] F. C., 5th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, 21 - 25 August 1972, Grenoble, Vol 1, p. 130.
- [148] F. C., Nonlinear saturation, Report UNICP - SR 92, October 1973
- [149] F. C., Einführung in die Plasmaphysik, Vol 2, Wellen sind Instabilitäten, Vieweg, Braunschweig 1972, (English translation, Pergamon, Oxford, 1973) and Monograph on plasma instabilities
- [150] International Congress on Waves and Instabilities in

- 34 -

Plasmas, Innsbruck, April 1973, Vol 1: Book of Abstracts, Vol 2: Survey Lectures.

- [151] F. C., D. Floriani, Similarity transformations in MGD, Reports SR 53, March 1968, SR 56, May 1968 UNICP - HWC 70, October 1970, UNICP - JWC March 1971, UNICP - JWC 72, march 1972, UNICP - JWD 72, December 1972
- [152] D. Floriani, Vereinfachung von Ähnlichkeitstransformationen, Monatshefte für Mathematik, Vienna 1974
- [153] F. C., Strongly nonlinear differential equations, Report UNICP - SR 90, April 1970, and J. Non-linear Mechanics (under press)
- [154] F. C., Anzeiger Österr. Akademie d. Wiss., 19. 10. 1972, p. 274 - 281. Nr. 11.
- [155] G. Tinhofer, Vlasov equation and Lie series, Reports SR 50, August 1967 and SR 51, October 1967
- [156] F. C., Collisional kinetic equations, Report UNICP - SR 77, May 1971 and Rev. Roum. Mec. Appl., (3) 17, 485 - 480 (1972)
- [157] F. C., Nuclear Fusion 12, 125 (1972), see also F. Cap,

- 35 -

Einführung in die Plasmaphysik, Band I, Vieweg
Braunschweig 1970 (English translation Pergamon,
Oxford, 1974)

- [158] F. C., Anzeiger österr. Akademie Wissenschaften Nr. 12
(1972)
- [159] P. Koch, Turbulent heating, Report UNICP - SR 70,
April 1970
- [160] L. Lerch, Plasma echoes, Report UNICP - SR 91, June
1972
- [161] P. Shukla, Bull. Amer. Phys. 1 F 7, Nr. 11, (1972)
- [162] P. Shukla, Radio Science 7, 1151 (1972)
- [163] S. Kuhn, Equilibria in arbitrary geometries, Reports
UNICP - SR 62, January 1969 and UNICP - SR 68,
December 1969, UNICP - SR 99, October 1973,
Thesis, Innsbruck 1971
- [164] S. Kuhn, paper R. 8 International Congress on Waves
and Instabilities in Plasmas, Innsbruck, April
1973.
- [165] F. C., N. Jen et al, Physics of quiescent plasmas,
Reports UNICP - SR 71, May 1970; UNICP - HWB 69,
Sept. 1969
- [166] F. C. et al, Untersuchungen an einer Q-Maschine,

- 36 -

Reports UNICP - JWB 71, march 71, UNICP - JWB
72, Dec. 1972

- [167] F. C. et al, The Innsbruck Q-machine, Elektrotechnik und Maschinenbau, 89, 49 (1972)
- [168] H. Helm, Anzeiger österr. Akademie d. Wissenschaften, Nr. 1, 7 - 11 (1972)
- [169] H. Helm, Anzeiger Österr. Akademie d. Wissenschaften, Nr. 11, 281 - 290 (1972)
- [170] F. C., Anzeiger österr. Akademie d. Wissenschaften, Nr. 12, p. 170 (1972)
- [171] F. C., J. Geophys. Research 77, 3328 - 3333 (1972)
- [172] P. Shukla et al, J. Appl. Phys. (1973)
- [173] P. Shukla et al, Synchrotron radiation from drifting magneto plasma, Int. J. Electronics (1973)
- [174] P. Shukla, Plasma Physics (1973)
- [175] P. Shukla, Can. J. Phys. (1972)
- [176] E. Maerk, Growth rate of ion cyclotron instability in the magnetospheric plasma, accepted J. of Geophysical Research 1973
- [177] M. Leubner, submitted to J. of Geophysical Research and to the Magnetospheric Cleft Symposium in Dallas, Texas, November 1973.
- [178] H. Gratzl, Physica 64, 608 - 612 (1973)

BIBLIOGRAPHY.

In the Preface we spoke of 100 Scientific Reports. Therefore and for completeness we give a complete bibliography of our reports, arranged according to the various projects.

I. US projects: SR - Reports. (blue)

1	Crocco theorem	April 1963
2	Potential Flow	April 1963
3	Pressure Hill	July 1963
4	MHD of finite conductivity	July 1963
5	see [58] Unsteady MHD	Aug. 1963
6	Thermodynamics of Plasma	Oct. 1963
7	Twodimensional potential flow	Feb. 1964
8	Variational methods	Feb. 1964
9	Unsteady MGD flow	April 1964
10	Flow patterns	April 1964
11	Unsteady MGD flow	June 1964
12	see [111], MGD waves	July 1964
13	see [112], Shock waves	Sept. 1964
14	see [57] Vortex theorems	Sept. 1964

- 38 -

15	Conference Report Juelich	July 1964
16	Conference Report Berlin, Paris MHD	Nov. 1964
17	see [65] Interaction	Oct. 1964
18	see [114] Numerical formulation	Dec. 1964
19	Variational method (steady)	Sept. 1964
20	Conference Report Karlsruhe	Oct. 1964
21	Conference Report Plasma Triest	Oct. 1964
22	see [113] Finite conductivity	Dec. 1964
23	see [115] Dispersion relation	March 1965
24	see [79] Finite conductivity	March 1965
25	see [70] Small Reynolds	Feb. 1965
26	Conference Report Plasma USA	May 1965
27	see [84] Small Reynolds	June 1965
28	see [67] Finite conductivity	March 1965
29	see [84] MHD accelerators	Dec. 1965
30	see [82] Weak solutions	June 1966
31	see [84] Small reynolds	June 1966
32	Variational method (unsteady)	March 1966
33	see [68] Numerical treatment	June 1966
34	see [66] Laval nozzle	May 1966
35	Conference Report Plasma Kiel	May 1966
36	see [117] Survey instabilities	Oct. 1966

37	Conference Report MHD Salzburg	Oct. 1966
38	Variational method (unsteady)	Sept. 1966
39	Variational method (steady)	Nov. 1966
40	see [71] Variational methods (unsteady)	Dec. 1966
41	see [85] Travelling wave accelerator	Dec. 1966
42	see [78] Boundary layer	March 1967
43	Conference Report Fusion Munich 1966 (First European)	Nov. 1966
44	Conference Report Plasma Munich 1966	Nov. 1966
FR 1	(1963 - 66) Gasdynamic Methods on MHD, Final Report 1963 - 1966	Dec. 1966
45	see [86] Coaxial hall accelerator	March 1967
46	see [117] Finite resistivity instabilities	April 1967
47	see [118] Helmholtz instability	June 1967
48	see [120] MHD stability	July 1967
49	Conference Report, 2nd European Stockholm	Sept. 1967
50	see [155] Vlasov Lie solution	Aug. 1967
51	see [155] Vlasov solution	Oct. 1967
52	see [108] Explosion ionosphere	Nov. 1967
FR 2	(1967) MHD and instabilities, Summary 1	Dec. 1967

- 40 -

53	see [151] Similarity transformations in MHD	March 1968
54	High conductivity effects	Feb. 1968
55	see [88] Ion slip, Hall effect	March 1968
56	see [151] Similarity solutions in MGD	May 1968
57	Boston Survey lecture on work in Innsbruck	April 1968
58	see [94] Viscous MGD flow	Nov. 1968
FR-68 (1968)	MHD and instabilities, Summary 2	Dec. 1968
59	see [125] Modes resistivity gradients	March 1969
60	see [121] Resistive viscous instabilities	Nov. 1968
61	see [163] Equilibria arbitrary geometries	Feb. 1969
62	see [123] General algorithm	Jan. 1969
63	see [118] Growth rate	Dec. 1968
64	see [134] Local potential	April 1970
65	see [127] Dissipative instabilities	June 1969
66	see [131] Resistive drift waves	June 1969
67	see [108] Explosion in ionosphere	Aug. 1969
	Work in Innsbruck 1968 - 69, Urbana, Ill.	May 1969
68	see [163] High frequency oscillations	Dec. 1969
69	see [131] Drift waves	Dec. 1969
FR 69 (1967 - 69)	Instabilities and MHD Final Report 1967 - 69, see [117]	Dec. 1969

- 41 -

- 70 see [159] Turbulent heating April 1970
- 71 see [165] Quiescent plasmas May 1970
- 72 see [129] MHD Poiseuille flow Sept. 1970
- 73 Conference Report, 4th European, Rome Sept. 1970
- 74 see [136] Nonlinear waves Oct. 1970
- 75 see [117] Survey Plasma Instabilities,
Vol 1, Dec. 1970
- FR 70 (1970) Plasma instabilities, Summary 1 Dec. 1970
- 76 see [140] Gyroviscosity Dec. 1971
- 77 see [156] Collisional kinetic equation May 1971
- 78 see [102] Non - equilibrium MHD flow May 1972
- 79 see [99] Variable properties MHD flow Aug. 1972
- 80 see [138] Amplitude dispersion July 1971
- 81 see [117] Survey Instabilities, Abstracts,
Vol 2 A June 1971
- 82 see [117] Survey Instabilities, Abstracts,
Vol 2 B July 1971
- 83 see [117] Survey Instabilities, Abstracts,
Vol 2 C Aug. 1971
- 84 see [117] Survey Instabilities, Abstracts,
Vol 2 D Sept. 1971
- FR 71 (1970 - 71) Plasma instabilities, Final

- 42 -

- Report 1970 - 1971 Dec. 1971
- 85 see [117] Survey Instabilities, Abstracts,
Vol 2 E Jan. 1972
- 86 see [117] Survey Instabilities, Abstracts,
Vol 2 F Feb. 1971
- 87 see [117] Survey Instabilities, Abstracts,
Vol 2 G March 1971
- 88 see [117] Survey Instabilities, Abstracts,
Vol 2 H April 1971
- 89 see [117] Survey Instabilities, Abstracts,
Vol 2 I May 1971
- 90 see [153] Nonlinear differential equation April 1972
- 91 see [160] Echoes in plasmas June 1972
- FR 72 (1972) Nonlinear oscillations, Summary
1, 1972
- 92 see [148] Nonlinear saturation Oct. 1973
- 93 see [144] Nonlinear dissipative parametric May 1973
- 94 see [117] Survey Instabilities 1971, part 1 Dec. 1972
- 95 see [117] Survey Instabilities 1971, part 2 Dec. 1972
- 96 see [117] Survey Instabilities 1972, part 1 June 1973
- 97 see [117] Survey Instabilities 1971, part 2 Dec. 1973
- 98 see [136] Nonlinear waves June 1973

- 43 -

99 see [164] Arbitrary geometry Oct. 1973
 100 this survey report Sept. 1973
 FR 73 (1973) Summary Report (1974) or Final
 Report (1972 - 1973) Dec. 1973

II. Ministry of Commerce and Technology (white)

HM 1 see [92] MHD power generation
 (1. Jan. - 30. June 1967) June 1967
 HM 2 see [92] MHD power generation
 (1. Jan. - 31. Dec. 1967) Dec. 1967

III. Technological Research Council UNICP - G reports (green)

(projects 189, 1738, o.o2/91)
 UNICP - HGA 68 see [97] 1.July - 31.Dec. 1968
 MHD efficiency (189) Dec. 1968
 UNICP - JGA 69 see [97] 1.July 68 - 30-June 69
 MHD efficiency (189) June 1969
 UNICP - HGB 70 see [98] 1.Oct. 69 - 30.April 70
 Heat losses (1738)
 UNICP - JGB 70 see [98] 1.Oct 69 - 31.Jan. 71

- 44 -

Heat losses (1738) Jan. 1971
 UNICP - HGB 71 see [98] 1.Feb. 71 - 31.Oct. 71,
 Heat losses (1738) Aug. 1971
 UNICP - JGB 72, see [98] 1.Nov. 71 - 31.Jan. 72
 Heat losses (1738) Final Report Pro-
 ject 1738 Jan. 1972
 UNICP - HGC 72 see [106] 1. Jul. 72 - 31.Dec.72
 Electrode corrosion (o.o2/91) Dec. 1972
 UNICP - HGB 72 see [107] 1.Jan. 73 - 30.June 73
 Electrode corrosion (o.o2/91) June 1973

IV. Scientific Research Council UNICP - W Reports

Physics: Projects 564, 600, 1103, 1453 orange
Mathematics: Projects 976, 1258 pink
 UNICP - HWA 68, see [93] 1.Apr. - 30.Sep.1968
 Analytic solutions (564) Sept. 1968
 UNICP - JWA 69, see [93] 1.Apr. - 31.March 1969
 Analytic solutions (564) March 1968
 UNICP - HWB 69, see [165] 1.Apr. - 30.Sep.1969
 Drift instability (600) Sept. 1969

- 45 -

- UNICP - JWB 70, 1.Apr.69 - 31.March 70
 Plasma turbulence (600) March 1970
- UNICP - JWB 71, see [166]1.Apr.70 - 30.March 71
 (Project 600),
 1.Jan.71 - 31.March 71
 Q-machine (1103) March 1971
- UNICP - JWB 72, see [166]1.Apr.71 - 31.Dec. 72
 Q-machine (1103) Dec. 1972
- UNICP - JWB 73 1.Jan.73 - 31.Dec. 73
 Q-machine (1453) Dec. 1973
- UNICP - HWC 70, see [151]1.Apr.70 - 30.Sept.70
 Similarity (976)
- UNICP - JWC 71, see [151]1.Apr.70 - 31.March 71
 Similarity (976) March 1971
- UNICP - JWC 71, see [151]1.Apr.71 - 31.March 72
 Similarity (976) March 1971
- UNICP - JWD 72, see [151]1.Apr.72 - 31.Dec. 72
 Similarity (976/1258)

V. Austrian Academy of Sciences UNICP - A reports (yellow)

- UNICP - AR 1 see [176] Cyclotron instability Oct. 1973
- UNICP - AR 2 see [177] Magnetosphere Oct. 1973