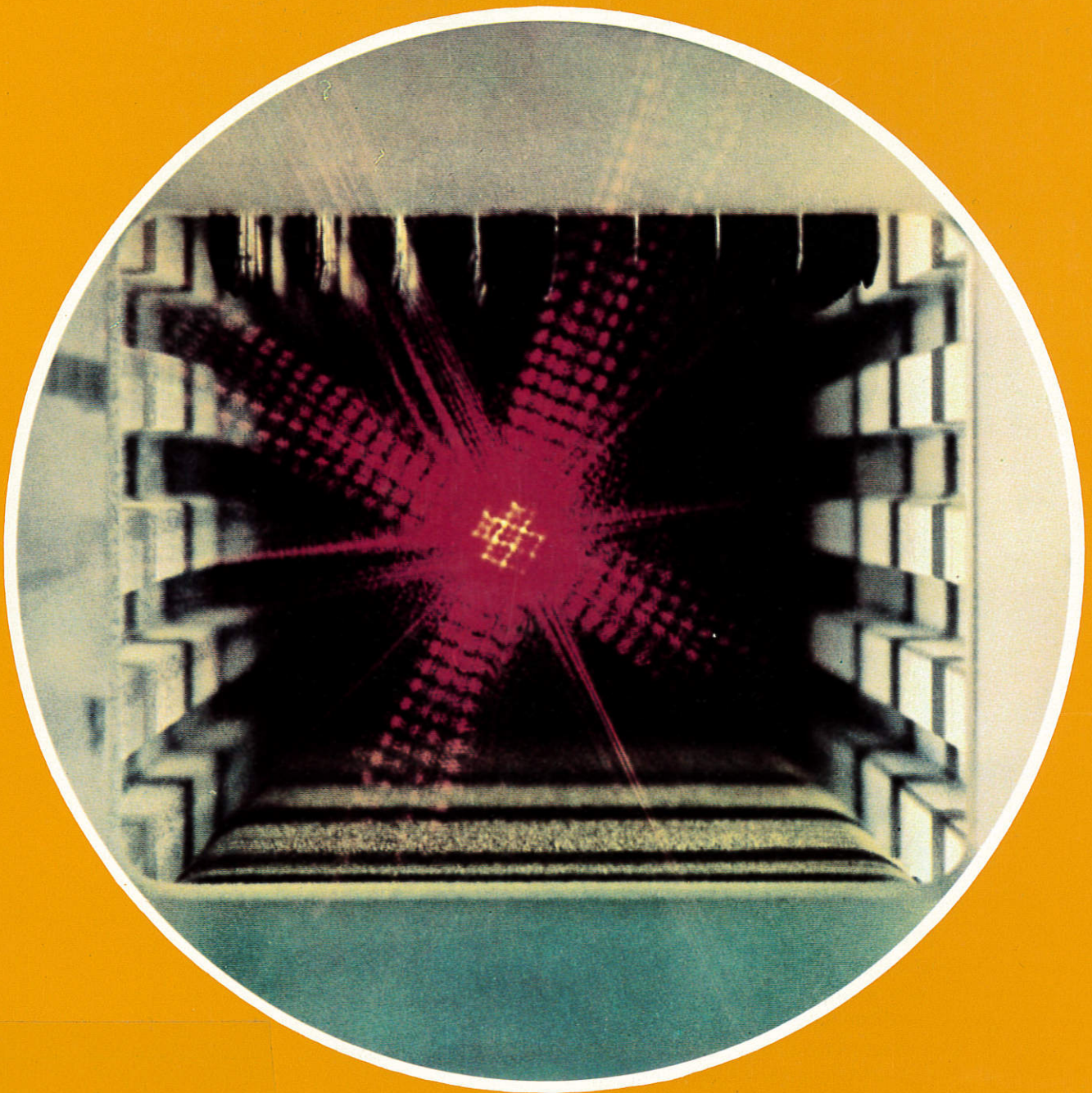


**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN**



JAHRESBERICHT 1974

264

Dieser IPP-Bericht ist für den Gebrauch innerhalb des Instituts angefertigt worden.

Der IPP-Bericht gibt die Ansicht der Autoren zur Zeit der Niederschrift und nicht notwendigerweise die des Instituts oder die endgültige Meinung der Autoren über den behandelten Gegenstand wieder.

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, die EURATOM-Kommission und alle in deren Namen handelnden Personen:

1. übernehmen keine Gewähr dafür, daß die in diesem Bericht enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder daß die Verwendung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen oder der in diesem Bericht beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;
2. übernehmen keine Haftung für die Schäden, die infolge der Verwendung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen oder der in diesem Bericht beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

For English translation see inside back cover.

● Das Farbfoto auf der ersten Umschlagseite zeigt einen Fluorwasserstoff-Laser mit Justierbeleuchtung. Solche Laser werden zur Plasmadiagnostik verwendet.

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

Jahresbericht 1974

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

18. Okt. 2012

Bibliothek

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Vertrages zwischen dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik.

A 35757

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	3
Das wissenschaftliche Programm des IPP	5
Bereich Hoch-Beta-Plasmen	7
1. Hoch-Beta-Stellarator	8
2. Belt-Pinch	12
Bereich Niedrig-Beta-Stellaratoren	18
1. Stellarator W II A	19
2. Stellarator W II B	20
3. Stellarator WEGA	23
4. Stellarator W VII	25
Bereich TOKAMAK	35
1. PULSATOR	36
2. Divertor-Tokamak ASDEX	42
Bereich Laserfusion und Wellenheizung	48
1. Erzeugung dichter Plasmen durch Laser	49
2. Photochemischer Jodlaser	52
3. Chemische Laser	54
4. Wellen im Plasma	55
Bereich Theorie	61
1. Theoretische Untersuchungen	62
2. Numerische Untersuchungen	64
3. Entwicklung numerischer Methoden	65
4. Bibliothek, Dokumentation	66
Projekt Plasma-Wand-Wechselwirkung	67
1. Überlegungen zur Plasma-Wand-Wechselwirkung	68
2. PHARAO, BOMBARDINO, 2,5 MeV-Beschleuniger	68
3. Rechnungen über Reichweiten und Schädigungs- verteilung beim Beschuß von Metallen mit leichten Ionen	70
4. BOMBARDON	71
5. SORBAS	71
6. Ionenmikrostrahlsonden	72
7. ESCA	73
8. Hochstromionenquelle	73
9. Experiment QWAASS	74
10. Feldemission spinpolarisierter Elektronen	74

	Seite
Bereich Informatik	75
1. Betrieb der Rechenanlage	75
2. AMOS-Entwicklung	77
3. Projekt Datenerfassung	78
4. EDV für das Rechnungswesen	78
Bereich Relativistische Plasmen	80
1. Elektronenring-Beschleuniger-Experiment	80
2. Neutralgaseinschluß	84
3. Theoretische Arbeiten	85
Bereich Technologie	86
1. Laser-Plasma-Quelle	86
2. CO ₂ -Laser-Entwicklung	92
3. Reaktorelektrotechnik	96
4. Systemstudien	98
5. Entwurfsstudien CTRD	99
6. Planung eines europäischen Supraleitungs- Programms	99
Zentrale Technische Einrichtungen	100
1. Energieversorgung und Betriebstechnik	102
2. Elektro- und Hochspannungstechnik	102
3. Elektronik — Entwicklung, Bau und Wartung	102
4. Mechanik — Konstruktion und Fertigung	102
5. Vakuum- und Materialtechnologie	104
6. Chemie und Galvanik	104
7. Läger und Gerätepool	104
Geschäftsführung und Verwaltung	105
Der organisatorische Aufbau des IPP	105
1. Kuratorium	105
2. Fachbeirat	105
3. Wissenschaftliche Leitung	106
4. Geschäftsführung	106
5. Verwaltung und Allgemeine Dienste	108
Veröffentlichungen und Konferenzberichte	113
Habilitation / Diplomarbeiten / Dissertationen	124
Laborberichte	125
Die Hochschulförderung des IPP:	
Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart	129
1. Wellen und Plasmaheizung	130
2. Laseranwendungen	132
3. Kurzzeittechnik	135
4. Dichte Plasmen	135
5. Veröffentlichungen und Konferenzberichte	138
6. Dissertationen, Diplomarbeiten und Laborberichte	139
IMPRESSUM und Lageplan	140

Vorwort

Die Fusionsreaktor-Forschung ist weltweit in einer raschen Entwicklung, und der Optimismus, dieses Ziel in absehbarer Zeit zu erreichen, ist nach Jahren intensiver Grundlagenforschung deutlich gestiegen. Die Anstrengungen konzentrieren sich mehr und mehr auf solche Arbeitsrichtungen, die im Hinblick auf das Endziel für besonders aussichtsreich gehalten werden, wobei technische Problemstellungen mit in den Vordergrund rücken.

Diese allgemeine Entwicklung ist nicht ohne Einfluß auf das wissenschaftliche Programm des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Garching (IPP) geblieben. Bei nahezu konstantem Personalstand war schon 1973 beschlossen worden, die Arbeiten des Instituts ausschließlich auf Untersuchungen zum magnetischen Einschluß von Plasmen auszurichten und die Arbeiten zur „Laser-Fusion“ Ende 1974 einzustellen — falls keine anderen Förderungsmöglichkeiten gefunden werden, die eine Personalentlastung bringen. Aber auch darüber hinaus muß das Institutsprogramm weiter gestrafft werden, da die einzelnen Experimente mit wachsender Größe und Aufwand personalintensiver werden. Dies stellt das Institut vor zunehmend schwierigere Entscheidungsprobleme. Nicht alle Vorhaben, die wissenschaftlich interessant erscheinen und aussichtsreiche Beiträge zur Erweiterung unseres plasma-physikalischen Verständnisses zu liefern versprechen, können in Angriff genommen oder noch durchgeführt werden.

Die TOKAMAK-Richtung wird heute vielfach als der aussichtsreichste Weg zu einem Fusionsreaktor angesehen. Wegen der zahlreichen noch nicht gelösten physikalischen Fragestellungen ist es nach unserer Überzeugung nicht an der Zeit, nur diese Richtung zu verfolgen. Damit würde ein Risiko eingegangen, das gegenwärtig zu hoch erscheint. Durch das europäische Großexperiment JET, an dem sich das Institut aktiv beteiligt, und durch die eigenen Experimente ASDEX und PULSATOR wird zwar der TOKAMAK-Entwicklung durch das Institut ein besonderes Gewicht gegeben. Darüber hinaus hat aber das Institut im Sinne eines ausgewogenen Programms seine Aktivitäten auf dem Hoch-Beta- und Stellarator-Gebiet beibehalten und wird sie noch weiter ausbauen. Damit besteht die Möglichkeit, Alternativkonzepte zur TOKAMAK-Richtung zu erarbeiten und zu verfolgen. Eine enge Wechselwirkung und gegenseitige Befruchtung der drei Hauptarbeitsrichtungen des Instituts wird durch geeignete Maßnahmen der inneren Koordination angestrebt und ist auch in einem zufriedenstellenden Maße vorhanden.

Neben den Hauptarbeitsrichtungen sind eine Reihe kleinerer Aktivitäten für das Institut von großer Wichtigkeit. Besonders zu nennen sind hier die Entwicklung verschiedener Plasma-Heiz- und -Nachfüllmethoden, Untersuchungen zur Plasma-Wand-Wechselwirkung, die Erstellung von Datenerfassungssystemen und die Arbei-

ten der Systemstudiengruppe. Diese Tätigkeiten dienen nicht nur einer Arbeitsrichtung sondern werden für alle Richtungen nutzbar gemacht. Auch die zahlreichen theoretischen Untersuchungen sind nach Möglichkeit so angelegt, daß sie bei durchaus spezifischer Fragestellung im einzelnen dem gesamten Institutsprogramm möglichst in optimaler Weise von Nutzen sind. Eine gleiche Aussage ist für die Informatik zu machen.

Die Untersuchungen zur „Laser-Fusion“ sind im Jahre 1974 ohne Einschränkung fortgeführt worden. Auch für die folgenden Jahre hat sich die Möglichkeit eröffnet, durch besondere Förderungsmaßnahmen diese Arbeiten fortführen zu können.

Die Arbeiten zur Ionenbeschleunigung mit Hilfe relativistischer Elektronenringe konnten 1974 erfolgreich fortgeführt werden, obwohl sie nicht unmittelbar in das Fusionsprogramm des Instituts einzuordnen sind. Es hat sich hier jedoch gezeigt, daß die aus der Plasmaphysik stammenden Erfahrungen in besonderem Maße zum Erfolg beigetragen haben.

Durch die oben skizzierte Entwicklung ist das Institut nicht mehr in der Lage, eine breite plasmaphysikalische Grundlagenforschung durchzuführen, die immer noch notwendig für die zukünftige Entwicklung der Fusionsforschung ist. Abstriche mußten auch am Technologie-Programm des Instituts gemacht werden, da das hierfür notwendige Personal dringend für den Aufbau und den Betrieb der großen Experimente benötigt wird. Ein Ausgleich kann hier nur dadurch gefunden werden, daß sowohl die breitere Grundlagenforschung wie auch die technologische Entwicklung stärkeren Eingang in Hochschulinstitute findet, und andere Einrichtungen an einem Fusionsprogramm teilhaben.

Aus diesem Grunde hat das IPP mit dem Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart eine enge Zusammenarbeit auf verschiedenen für das IPP-Programm wichtigen Teilgebieten begonnen, über die auch hier berichtet wird.

Eine ähnliche Zusammenarbeit ist Ende 1974 mit dem Physik-Department der Technischen Universität München auf dem Gebiet der Plasma-Wand-Wechselwirkung begonnen worden, und mit der Gesellschaft für Kernforschung mbH in Karlsruhe (GfK) besteht Einvernehmen über eine Kooperation zur Entwicklung supraleitender Spulen.



(Prof. Dr. Rudolf Wienecke)

Wissenschaftlicher und technischer Geschäftsführungsbereich

Wissenschaftlicher Direktor: Prof. Dr. R. Wienecke

Bereich Hoch-Beta-Plasmen Direktor: Prof. Dr. E. Fünfer

Projekt Hoch-Beta-Stellarator

- Plasmagleichgewicht bei großer helikaler Verformung
- Plasmaheizung durch Stoßkompression
- Wandstabilisierung der $m = 1$ Instabilität
- Stabilisierung von Moden $m > 1$

Projekt Belt-Pinch

- MHD-stabile Gleichgewichte bei nicht kreisförmigen Plasmaquerschnitten
- starke Stoßwellenheizung

Bereich Niedrig-Beta-Stellaratoren Direktor: Dr. G. Grieger

Projekt WENDELSTEIN VII A

- Toroidaler Plasmaeinschluß im $l = 2$, $m = 5$ Stellarator
- Plasmaerzeugung und -aufheizung durch Ohmsche Heizung
- Plasmastabilität und Einfluß von Verunreinigungen
- Plasmaerzeugung durch Laser-Pellet-Wechselwirkung

Projekt WENDELSTEIN VII B

- Erstellung der 2. Ausbaustufe des Stellarators W VII
- Ausweitung des Plasmaparameterbereichs
- zusätzliche Plasmaheizung durch Neutralinjektion, Clusterinjektion und HF-Heizung

Projekt WEGA

- Plasmaheizung durch HF
- Bau und Inbetriebnahme des Stellarators WEGA in Grenoble

Bereich TOKAMAK Direktor: Dr. G. von Gierke

Projekt PULSATOR

- Gleichgewicht und Stabilitätsverhalten eines TOKAMAK-Plasmas
- Abbruchinstabilität
- Stabilisierung durch schwache helikale Felder
- Magnetischer Limiter

Projekt ASDEX

- Tokamak-Experiment mit magnetischem Limiter und axialsymmetrischem Divertor bei Ionentemperaturen im keV-Bereich

JET

- Mitarbeit am gemeinsamen europäischen TOKAMAK

Bereich Laserfusion und Wellenheizung Direktor: Dr. S. Witkowski

Hochleistungslaser und Anwendungen

- Entwicklung eines 1 kJ/1 ns Jodlasers
- Licht-Plasma-Wechselwirkung
- Erzeugung heißer und dichter Plasmen durch Laserstrahlung
- Neue Lasersysteme, chemische Laser

LIWEREX

- Hochfrequenzheizung in linearer Geometrie im Bereich der unteren Hybridenfrequenz
- kohärente Streuung von IR Laserlicht und Millimeterstrahlung an Plasmawellen

Bereich Technologie Direktor: Dipl.-Ing. K.-H. Schmitter

Projekt Laser-Pellet-Quelle

- Füllung von magnetischen Einschlußexperimenten mit laser-erzeugten Plasmen
- Entwicklung von Pellet-Quellen

Projekt Systemstudien

- Computermodelle für Fusionsreaktorsysteme
- Vergleich verschiedener Reaktorkonzepte

Projekt Reaktorelektrotechnik

- Technologie der elektrischen Systeme für Plasmaeinschließung und Heizung
- Supraleitungstechnologie

Bereich Theorie Direktor: Prof. Dr. D. Pfirsch

Theoretische Grundlagen der Plasmaphysik

- Toroidale Plasmagleichgewichte
- Diffusion
- Makro- und Mikroinstabilitäten
- Plasmaturbulenz
- Mehrflüssigkeitscodes

Projekt Plasma-Wand-Wechselwirkung

- Wechselwirkung von Ionen mit Metalloberflächen
- Oberflächenuntersuchungen in Plasmaapparaturen (QWAASS)

Bereich Relativistische Plasmen Direktor: Prof. Dr. A. Schlüter

Kollektiver Ionenbeschleuniger mit Elektronenringen

- Herstellung und Kompression von Ringen aus relativistischen Elektronen
- Beschleunigung von Elektronenringen in einem statischen divergenten Magnetfeld
- Beladung von Elektronenringen mit schweren Ionen

Bereich Informatik Direktor: Prof. Dr. F. Hertweck

Projekt Datenerfassung

- Entwicklung von Datenerfassungssystemen für die Experimente des IPP

Betrieb der Rechenanlage IBM 360/91

- Entwicklung des Betriebssystems „AMOS“

Bereich Hoch-Beta-Plasmen

(Prof. Dr. Ewald Fünfer)

Nach heutiger Ansicht ist ein wirtschaftlich arbeitender Fusionsreaktor nur denkbar, wenn er mit Beta-Werten größer als etwa 10% arbeitet. Hoch-Beta-Experimente, wie sie im IPP Garching durchgeführt werden, lassen ohne Schwierigkeit Beta-Werte erreichen, die in einem großen Bereich bis nahe 100% variiert werden können. Dies ist in der speziellen Eigenart der Herstellung und der Aufheizung des Plasmas begründet, die durch schnelle magnetische Kompression erfolgt. Die TOKAMAK- und Niedrig-Beta-Experimente erreichen heute nur Beta-Werte unterhalb 1%. Damit können diese Experimente auch zur Zeit noch nicht einige für den Reaktorbetrieb wesentliche Fragen – wie z. B. die MHD-Stabilität bei höheren Beta-Werten – beantworten. Probleme dieser Art sind jedoch seit langem bei Hoch-Beta-Experimenten bekannt und teilweise bearbeitet worden. Die Ergebnisse würden sich mit einiger Wahrscheinlichkeit auch auf TOKAMAK-Experimente übertragen lassen, wenn es gelänge, sie in den Bereich höherer Beta-Werte zu bringen.

Unabhängig von der noch nicht geklärten Frage, ob eine Hoch-Beta-Konfiguration in Richtung Fusionsreaktor ausbaufähig ist, muß man also Projekte dieser Art als eine notwendige Alternative zum TOKAMAK und zum Niedrig-Beta-Stellarator sehen, insbesondere dann, wenn sich herausstellen sollte, daß z. B. die Erreichung höherer Beta-Werte bei diesen Konfigurationen auf unüberwindliche Schwierigkeiten stoßen sollte.

Im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik werden zwei Hoch-Beta-Projekte bearbeitet: der Hoch-Beta-Stellarator und der Belt-Pinch.

Der Hoch-Beta-Stellarator ist eine nicht-axial-symmetrische Anordnung mit großem Aspektverhältnis. Im Laufe des Jahres wurde ein Projekt für ein größeres Experiment erarbeitet, das vor allem Fragen der MHD-Stabilität unter Berücksichtigung der Wandstabilisierung klären soll.

Der Belt-Pinch ist eine axialsymmetrische Anordnung, die der Konfiguration nach einem TOKAMAK mit stark elongiertem Plasmaquerschnitt verwandt ist.

Beim Belt-Pinch II wurde im vergangenen Jahre ein stabiles Verhalten bei q -Werten im Bereich von 2–3 nachgewiesen – also etwa wie beim TOKAMAK mit kreisförmigem Plasmaquerschnitt. Unter diesen Bedingungen lagen die β -Werte des Belt-Pinch bei etwa 50% gegenüber etwa 0,5% beim TOKAMAK. Bei einer Lebensdauer des Plasmas von etwa 1 msec war die Hoch-Beta-Phase durch Strahlungsverlust allerdings auf etwa 50 μ sec begrenzt. Dies soll in der nun folgenden Ausbaustufe durch Erhöhung der Temperatur des Plasmas verbessert werden.

1. HOCH-BETA-STELLARATOR

(M. Kaufmann, W. Braun, W. Engelhardt, J. Gruber, F. Herrnegger, W. Köppendörfer, E. Lackner, B. Marder*), M. Münich, J. Neuhauser, E. Oberlander, H. Röhr, W. Schneider, G. Schramm, U. Seidel, J. Sommer, R. Süß, R. Wunderlich)

Der Hoch-Beta-Stellarator (HBS) stellt eine deutliche Alternative zum TOKAMAK dar und unterscheidet sich in wesentlichen physikalischen Eigenschaften auch vom Niedrig-Beta-Stellarator. Der HBS ist ein schlankes, toroidales Gleichgewicht ohne wesentlichen toroidalen Strom. Das Gleichgewicht wird bei typisch hohen Beta-Werten ($\beta = 0,6 \dots 0,9$) durch eine Kombination von schraubenförmigen ($\ell = 1$) Verformungen der Plasmasäule mit elliptischen ($\ell = 2$) und bauchförmigen ($\ell = 0$) Verformungen erreicht.

Die Untersuchung dieser speziellen Konfiguration mit für einen Reaktor vorteilhaften hohen Beta-Werten wird durch zwei theoretische Aussagen unterstützt.

- Die ($\ell = 1$)-Konfiguration hat günstige Stabilitätseigenschaften bei hohen Beta-Werten für die im Experiment häufig beobachtete $m = 1$ Mode. Voraussetzung ist allerdings ein kleines Kompressionsverhältnis der Plasmasäule.
- Bei ausreichend großer Amplitude erzeugt die schraubenförmige ($\ell = 1$)-Verformung ebenfalls bei hohen Beta-Werten einen magnetischen Topf. Dieser sollte Moden kurzer Wellenlänge senkrecht zum Feld stabilisieren.

Experimentell sind HBS-Gleichgewichte in Los Alamos und in Garching untersucht worden. In zunächst linearen Vorversuchen konnte hier gezeigt werden, daß die gewünschte Konfiguration in einem Stoßwellenexperiment erzeugt werden kann. Damit war sichergestellt, daß hohe β -Werte und hohe Temperaturen experimentell erreichbar sind.

Anschließend wurde das HBS-Gleichgewicht am ISAR T 1-Experiment zum ersten Male in einem Torus untersucht. Wesentliche theoretische Aussagen konnten in diesem Experiment bestätigt werden (Bedingungen für das toroidale

Gleichgewicht, Anwachszeiten von ($m = 1$)-Moden). Dagegen war es nicht möglich, in diesem Experiment die ($m = 1$)-Mode zu stabilisieren, da ein niedriges Kompressionsverhältnis nicht realisierbar war.

Ausgehend von den experimentellen Ergebnissen und dem Stand der Theorie wurde schon im Jahre 1973 der Vorschlag für ein neues Experiment HBS II ausgearbeitet (IPP 1/139).

Entscheidende Zielsetzung für dieses Projekt ist die Demonstration der MHD-Stabilität. Abweichend von älteren Theta-Pinch-Experimenten muß daher im HBS II das Kompressionsverhältnis ausreichend niedrig sein, und das Plasma darf nur durch die Stoßwelle aufgeheizt werden. Die wichtigsten Parameter des vorgeschlagenen Experiments sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Temperatur	500 ... 1000 eV
Dichte	10^{15} cm^{-3}
Beta	0,7
Großer Radius	8 m
Kleiner Spulenradius	10 cm
Kleiner Plasmaradius	4 cm
Radius der Plasmahelix	6 cm
Magnetfeld	0,7 T
Anstiegszeit	0,5 μs

Parallel zu diesen vorbereitenden Arbeiten für das Projekt HBS II sollen in einem weiteren Experiment an der Batterie ISAR T 1 Gleichgewichte mit extrem großen helikalen ($\ell = 1$)-Verformungen untersucht werden. Für den Aufbau des Experiments konnte zum ersten Male ein schraubenförmig geformtes, toroidales Quarzgefäß benutzt werden.

Im Berichtsjahre wurde das Projekt in verschiedenen Richtungen vorbereitet. In einer experimentellen Untersuchung an ISAR II wurde in einem 1 m langen Theta-Pinch die schwache Kompression bei den Zieldaten für Füllichte und Magnetfeldanstieg untersucht. Technisch wurde die Herstellung des Quarzrohres für das HBS II-Projekt erprobt und ein Baustein für die schnelle Magnetfeldbatterie entwickelt. Zur theoretischen Vorbereitung wurde insbesondere die Stabilität helikaler Gleichgewichte weiter untersucht.

1.1 Experimentelle Voruntersuchung zum HBS II (Isar II)

An ISAR II sollte in linearer Geometrie zur Vorbereitung der HBS II-Experimente untersucht werden, ob

- eine wirksame Plasmakompression bei 4,4 mtorr Deuterium möglich ist,
- die Plasmaparameter, die dem HBS II-Projektvorschlag zugrunde gelegt sind, erreichbar sind,
- ein ausreichend niedriges Kompressionsverhältnis $\kappa \approx 2,5$ eingestellt werden kann.

Dazu mußte zunächst ein geeigneter Magnetfeldimpuls erzeugt werden und das Problem der Zündung und Vorionisierung bei niedrigem Druck gelöst werden. Eine bestimmte Schaltung einzelner Kondensatorgruppen von Isar II ermöglichte es, in einer 1 m langen Spule mit 20 cm Durchmesser einen Magnetfeldimpuls zu erzeugen, der in 600 Nanosekunden ansteigt und dann über 10 Mikrosekunden bei etwa 0,65 Tesla konstant bleibt.

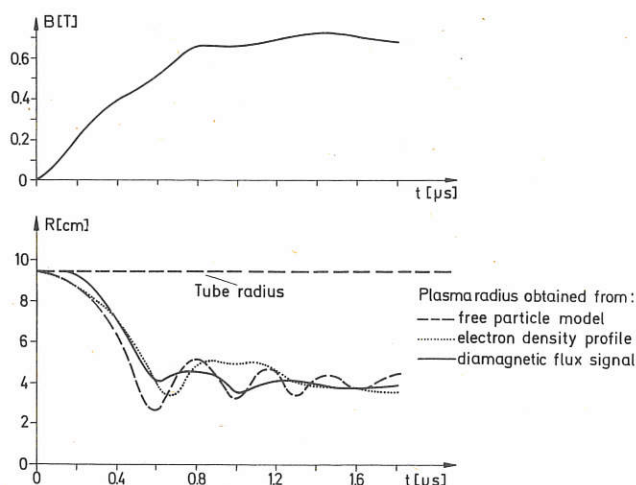


Abb. 1: Untersuchung der schwachen Kompression an ISAR II: Magnetfeld und Plasmaradius als Funktion der Zeit.

*) Gastforscher aus Los Alamos, Los Alamos Scientific Laboratories/USA.

Zur Zündung und Vorionisierung wurden zwei Marx-Generatoren mit 80 und 120 kV Stoßspannung verwendet. Beide wurden axial über Elektroden entladen. Vollständige Ionisierung bei 4 mtorr konnte mit durchschwingender Vor-entladung von mindestens 50 kA Stromamplitude erreicht werden.

Die Thetapinchentladung erfolgte, kurz bevor die Liniendichte der Elektronen merklich abnahm. Interferometrische Dichtemessungen im Infraroten und im Sichtbaren zeigten, daß

- das Plasma durch die Stoßwelle vollständig aufgesammelt wird,
- die Kompressionschwingungen nach 0,6 Mikrosekunden ausgedämpft sind,
- die Halbwertsbreite des Dichteprofils im Gleichgewicht $r_H = 3,7$ cm beträgt (siehe Abb. 1 auf Seite 8).

Schmierbildaufnahmen deuten darauf hin, daß das einer Gaußkurve ähnliche Profil eine Folge von Raleigh-Taylor-Instabilitäten der Kompressionsphase ist. Aus diesem Dichtepprofil folgt ein Kompressionsverhältnis von $\kappa = 2,6$. Damit und mit dem diamagnetischen Fluß ergibt sich auf der Achse $\beta = 0,85$. Neutronenmessungen ergeben bei Annahme einer dreidimensionalen Maxwellverteilung eine Ionentemperatur von etwa 600 eV.

Zur Zeit werden durch Laserlichtstreuung die lokalen Elektronentemperaturen gemessen. Anschließend sollen im Außenbereich des Plasmas mit einem CO₂-Laserinterferometer die Elektronendichten genauer erfaßt werden. Neutronenmessungen und spektroskopische Messungen bei verschiedenen Füllgasen sollten weiteren Einblick in die Plasma-Wand-Wechselwirkung geben.

Die Ergebnisse der bisherigen Messungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die im HBS II-Projektvorschlag angestrebten Plasma-parameter, das notwendig hohe Beta und ein niedriges Kompressionsverhältnis lassen sich in reproduzierbarer Weise bei entsprechendem Magnetfeldimpuls, geeigneten Füllverfahren, Zündung und Vorentladung herstellen.

1.2 Isar T1 – B: Ein toroidaler HBS mit großer helikaler Amplitude

An der toroidalen Thetapinch-Anlage ISAR T1 sind in den vorangegangenen Berichtsjahren eingehende Untersuchungen zum toroidalen Gleichgewicht und zur Stabilität des Hoch-Beta-Stellarators bei stark komprimierter Plasmasäule durchgeführt worden (siehe Jahresbericht 1973). Eine umfassende Darstellung der Ergebnisse wird in Nuclear Fusion¹⁾ veröffentlicht.

Als erstes, größeres Experiment dieser Art war ISAR T1 im Spulenbereich zunächst auf größtmögliche Flexibilität und Einfachheit ausgelegt (Erzeugung der helikalen ($\ell = 1$)- und ($\ell = 2$)-Felder und des Dipolfeldes durch Zusatzwindungen und separate Kondensatorbatterien; rotationssymmetrischer Quarztorus als Vakuumgefäß). Dafür mußte eine Reihe von Nachteilen in Kauf genommen werden: Beschränkung der Hauptbatterieenergie auf 0,5 MJ (max. 2,6 MJ möglich) und damit niedrigere Temperaturen (< 250 eV), Anregung von starken helikalen Einstellschwingungen des

Plasmas, Begrenzung der maximalen helikalen Plasmaauslenkung, Wandberührung bereits bei geringer Plasmaverschiebung, eingeschränkte Beobachtungsmöglichkeit.

Neben der Forderung, diese Einschränkungen zu vermeiden, bestand aber auch der Wunsch – insbesondere im Hinblick auf den geplanten HBS II – Gleichgewichte mit großem δ_1 , also extremer schraubenförmiger Auslenkung der Plasmasäule zu untersuchen. Diese könnten bezüglich Wandstabilisierung der ($m = 1$)-Mode vorteilhaft sein. Die Existenz linearer, helikaler Gleichgewichte mit $\beta \cdot \delta_1 \gg 1$ ist zwar inzwischen theoretisch gezeigt worden²⁾, jedoch gibt es bisher keine zuverlässigen Theorien für entsprechende toroidale Gleichgewichte und deren Stabilität. Ebenfalls im Hinblick auf HBS II sollten Methoden und Techniken zur Herstellung geformter Spulen und Gefäße getestet werden.

Unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse und der erweiterten Fragestellung wurde deshalb im Berichtsjahre der Spulenbereich umgebaut (Version ISAR T1 – B):

- **Spule:** Die innere Oberfläche der toroidalen Thetapinch-Spule ist so geformt, daß sie näherungsweise einer Flußfläche eines toroidalen Hoch- β -Gleichgewichts entspricht. Die entsprechenden helikalen Feldkomponenten ($\ell = 1, \ell = 2, \ell = 0$) werden damit automatisch durch Verbiegung des toroidalen Grundfeldes erzeugt. Die komplizierte Spulenform wird durch die Verwendung von Aluminiumgußteilen ermöglicht, die in die vorhandenen Spulenschalen eingesetzt werden. Diese Methode ist in Zusammenarbeit mit F. Werner und H. Breit (siehe Jahresbericht 73, S. 151) entwickelt und getestet worden. Durch zusätzliche $\ell = 2$ Windungen können die Gleichgewichtsparameter noch ausreichend variiert werden.
- **Gefäß:** Wegen der im wesentlichen schraubenförmigen Gestalt von Plasma und Spule muß das Quarzgefäß ebenfalls schraubenförmig gebogen sein. Deshalb wurde eine Ziehvorrichtung entwickelt, die es ermöglicht, aus geraden Quarzrohren helikal-toroidal verformte Rohre herzustellen.

In Abb. 2 auf Seite 10 ist ein Ausschnitt der toroidalen Spule (hintere Hälfte) mit eingebautem helikal verformten Quarzgefäß zu erkennen.

Die wesentlichen Parameter der bisherigen und der neuen Version sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

	ISAR T1	ISAR T1-B
Großer Spulendurchmesser	2,71 m	2,71 m
Kleiner Spulendurchmesser, innen	21 cm	17 cm
Gefäß-Durchmesser, innen	9,2 cm	9,2 cm
Anzahl der Perioden auf dem Umfang	24	16
Hauptfeld B ₀	1,4 T	1,4 ... 3,5 T
Anstiegszeit	5,5 μ s	5 ... 8 μ s
Relative helikale Plasma-verformungen	$\left. \begin{array}{l} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_0 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 0 \dots 1,5 \\ 0 \dots 0,3 \\ 0,06 \end{array} \right\}$
		3 0,05 ... 0,15 0,1

Die Experimente mit der Version ISAR T1-B werden im Frühjahr 1975 beginnen.

¹⁾ E. Fünfer, M. Kaufmann, W. Lotz, J. Neuhauser, G. Schramm, U. Seidel Nucl. Fus. 15 (1975) 138

²⁾ B. Marder – wird noch veröffentlicht.

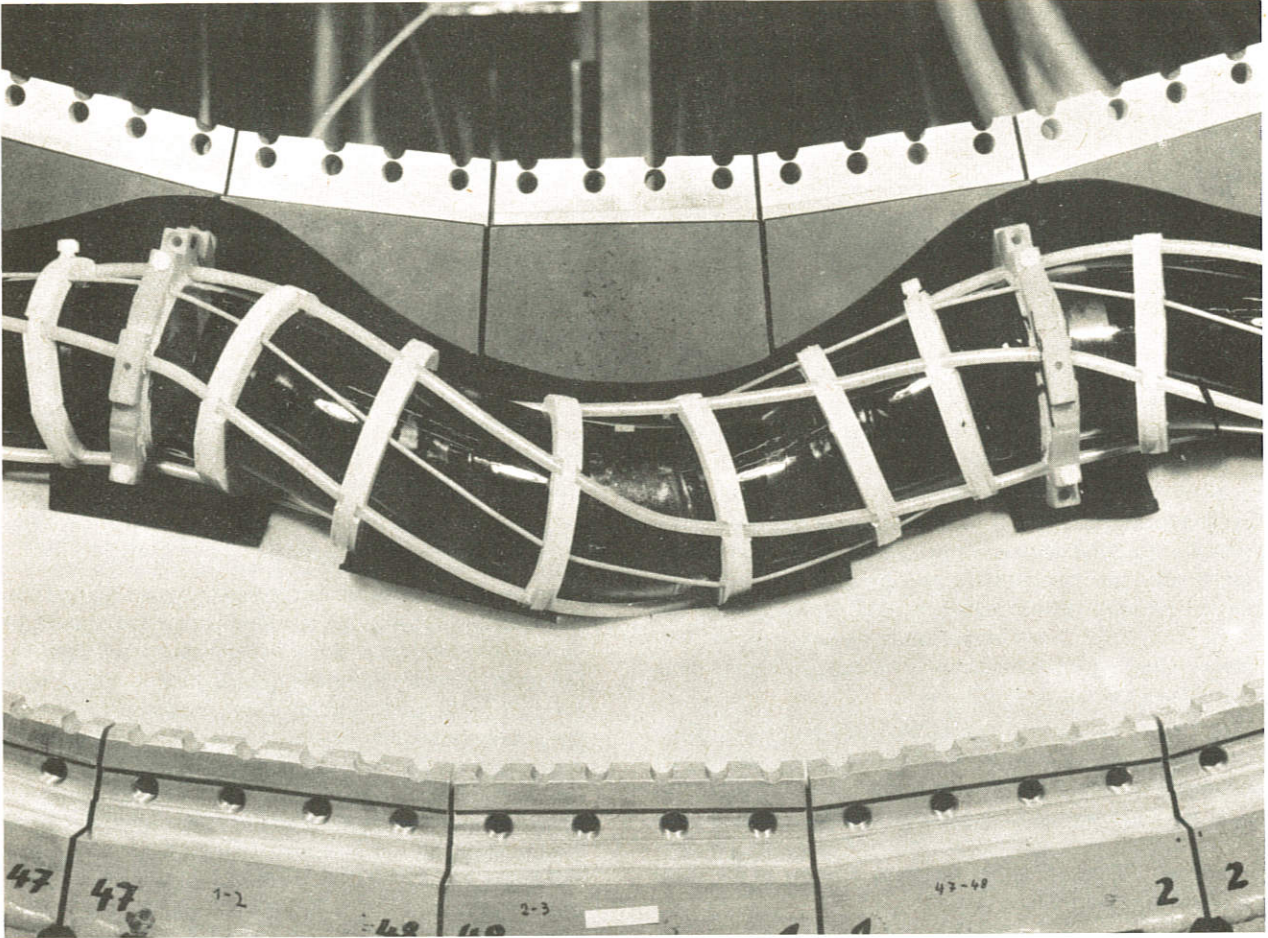


Abb. 2: Torussegment an ISAR TI-B: Die starke helikale Verformung des Quarzgefäßes und der Spulenoberfläche (hintere Hälfte) sind erkennbar.

1.3 Technische Vorbereitungen zum HBS II

1.3.1 Magnetfeldbatterie

Wie bereits erläutert wurde, ist es im HBS II-Experiment notwendig, das Plasma ausschließlich durch Stoßwellenheizung aufzuheizen. Dies setzt ein Magnetfeld mit ausreichender Anstiegssteilheit ($\approx 1 \text{ T}/\mu\text{s}$) voraus, welches nach kurzer Anstiegszeit ($\approx 0,5 \mu\text{s}$) konstant gehalten werden kann. Dabei ist es in einer ersten Phase zur Untersuchung der MHD-Stabilität notwendig, das Magnetfeld mindestens $50 \mu\text{s}$ konstant zu halten.

Die kurze Anstiegszeit stellt hohe Anforderungen an den Start- und Crowbarkreis einer solchen Magnetfeldbatterie, und es war notwendig, Voruntersuchungen durchzuführen. Zunächst wurden einzelne Komponenten untersucht. Sowohl schnelle 40 kV-Kondensatoren für den Startkreis als auch MP-Kondensatoren für den Power-Crowbar wurden in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt. Intern wurden geeignete schnelle Funkenstrecken untersucht.

Nach der Untersuchung einzelner Komponenten wurden zwei größere Testeinheiten zur Festlegung der Batterie für das Hauptmagnetfeld errichtet und in Betrieb genommen. In einer Version A wurde ein Baustein mit offenen Funkenstrecken bei 40 kV (siehe Abb. 3) und in der Version B Druckfunkenstrecken bei 80 kV (siehe Abb. 4) untersucht. In beiden Versionen konnte eine ausreichend niedrige Batterie-

induktivität, eine befriedigende Crowbarwelligkeit und ein zufriedenstellender Parallelbetrieb der eng verkoppelten Schaltkreise erreicht werden. Die endgültige Festlegung der Magnetfeldbatterie wird von Dauertests abhängen, die insbesondere die Vorzündsicherheit klären müssen.

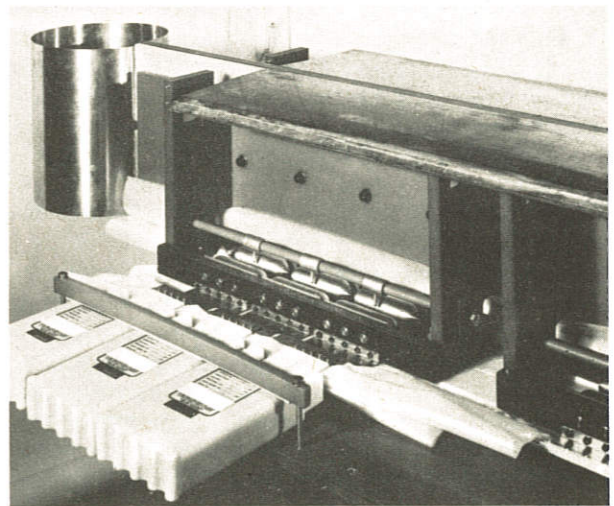


Abb. 3: Tests für die schnelle Magnetfeldbatterie (A): Die offenen Funkenstrecken sind erkennbar.

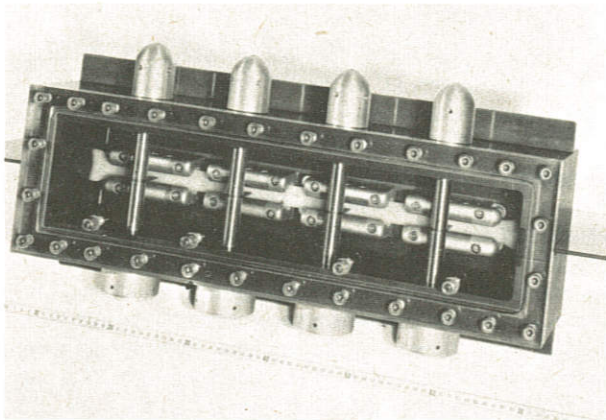


Abb. 4: Tests für die schnelle Magnetfeldbatterie (B):
Niederinduktive 4-fach-Druckfunkenstrecke (Quadrogap)

1.3.2 Entladungsgefäß

Die Stabilitätsüberlegung für einen Hoch-Beta-Stellarator zeigt, daß das Plasma sowohl ausreichend wandnah, als auch mit einer hinreichend großen Amplitude schraubenförmig verformt sein muß. Dies zusammen ist nur möglich, wenn das Entladungsgefäß der helikalen Form der Plasmasäule folgt. Es war also eine entscheidende Voraussetzung für das HBS II-Projekt, ein solches helikal-toroidal geformtes Gefäß

herzustellen. Dieses Gefäß sollte zugleich möglichst noch aus Quarz sein, wie es sich bei Stoßentladungen allgemein bewährt hat. Es ist nun ein Verfahren entwickelt worden, solche Rohre herzustellen, und es wurde ein kompletter Torus für ISAR T1 und ein Segment für HBS II hergestellt (siehe Abb. 5). Bei diesem Verfahren wird ein zylindrisches Quarzrohr durch eine Flamme gezogen und dabei erweicht. Durch eine geeignete mechanische Vorrichtung wird das Quarzrohr hinter der erhitzten Stelle genau so geführt, daß die gewünschte Form entsteht.

1.4 Theoretische Untersuchungen von HBS-Gleichgewichten

1.4.1 Helikales Gleichgewicht

Bisher sind helikale Gleichgewichte nur unter stark vereinfachenden Annahmen (Oberflächenstrom, Entwicklung nach kleinen Parametern) berechnet worden. Es wurde jetzt das helikale Randwertproblem ohne wesentliche Einschränkungen gelöst³⁾, und es war möglich, Parameterstudien durchzuführen. Es zeigte sich dabei, daß für die angestrebten Projektdaten „vernünftige“ Gleichgewichte existieren. Grundsätzlich ergab sich im Gegensatz zu den Rechnungen im Oberflächenstrommodell, daß keine vergleichbare Begrenzung für $\beta \cdot \delta_1$ existiert. Auch für sehr große helikale Verformungen ($\epsilon_1 = 5$) wurden Gleichgewichte für große β gefunden.

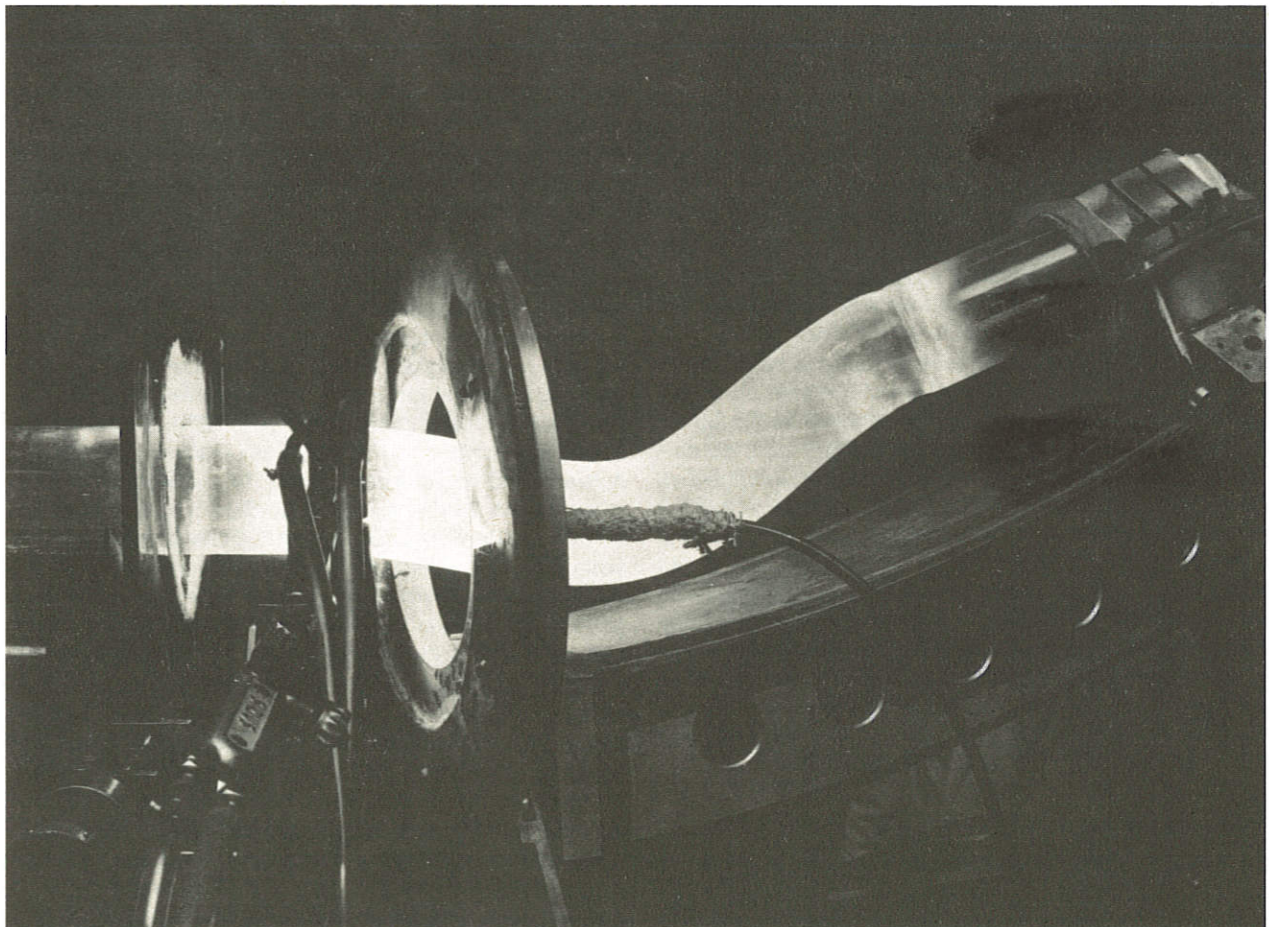


Abb. 5: Herstellung des helikal-toroidal geformten Quarzgefäßes: Das zylindrische Quarzgefäß läuft von links durch die Flammenzone

1.4.2 Stabilität helikaler Gleichgewichte

In zwei verschiedenen Rechnungen wurde die MHD-Stabilität helikaler Gleichgewichte weiterverfolgt.

a) Es wurde eine δW -Analyse in helikaler Symmetrie für diffuses Profil durchgeführt³⁾. Während β und helikale Verformung $\delta_1 = \text{Helixradius/Plasmaradius}$ als endlich angenommen wurden, wurde nach $\xi = \text{Plasmaradius} \times \text{helikale Wellenzahl}$ entwickelt. Die Rechnungen haben die Ergebnisse für das Oberflächenstrommodell bestätigt:

- Wandstabilisierung der ($m = 1$)-Mode wird selbst für große helikale Verformungen durch den Ausdruck des Oberflächenstrommodells richtig beschrieben.

- ($m = 2,3$)-Moden sind in führender Ordnung instabil. Die Anwachsraten sind etwa um den Faktor 2 kleiner als im Oberflächenstrommodell.

b) In einer zweiten Stabilitätsuntersuchung wurden helikale Gleichgewichte ohne irgendwelche Beschränkungen auf kleine Parameter untersucht. Dazu werden die idealen MHD-Gleichungen linearisiert und längs der vernachlässigbaren Koordinate Fourier-analysiert. Dieses 2 D (x, y, t) Anfangs-Randwertproblem wird numerisch gelöst, analog dem in / 9 / beschriebenen Verfahren. Die Rechnungen werden durchgeführt in einem rotierenden (x, y)-Koordinatensystem, in welchem auch das helikale Gleichgewicht numerisch berechnet wird. Diese Methode erlaubt es, ohne weitere Näherungen die Eigenfunktionen und Eigenwerte für verschiedene (m, k)-Moden zu berechnen (siehe Abb. 6).

Stabile Schwingungen können durch eine zeitliche Mittelung weitgehend unterdrückt werden.

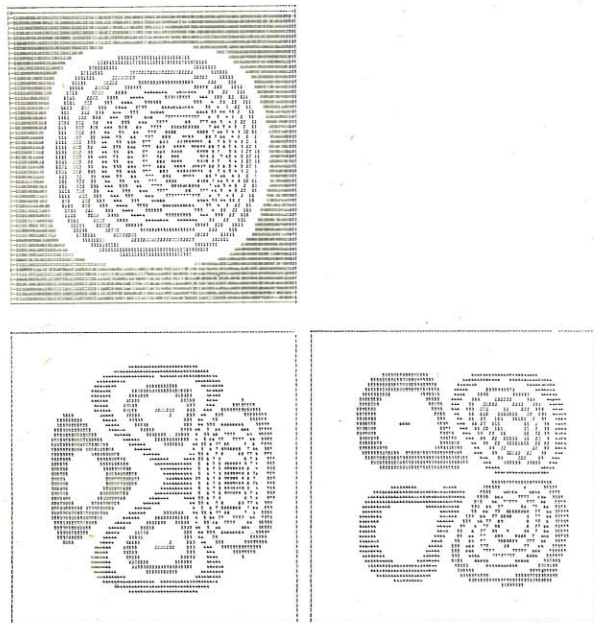


Abb. 6: MHD-Stabilität helikaler Gleichgewichte: Das obere Bild zeigt Linien konstanten Drucks für das Gleichgewicht, die unteren Bilder zeigen den gestörten Druck für eine $m=2$ -Instabilität in zwei Plasmalagen.

2. BELT-PINCH

(R. Wilhelm, G. Becker, F. Braun, R. Chodura, A. Eberhagen, O. Gruber, H. Herold, M. Kornherr, H. Krause, F. Lindemberger, J.-M. Peiry, W. Schneider, F. Söldner, K.-H. Steuer)

Das zweite Projekt im Bereich „Hoch-Beta-Plasmen“ verfolgt die Linie des **axial-symmetrischen**, toroidalen Plasmaeinschlusses, also Gleichgewichte von TOKAMAK- oder Screw-Pinch-Typ. Die physikalische Zielsetzung, auch hier zu höheren, zumindest reaktorrelevanten β -Werten zu gelangen, hat dabei zum stark **nichtkreisförmigen** Plasmaquerschnitt (Belt-Pinch) geführt. Durch die so mögliche Vergrößerung des „kleinen“ bzw. poloidalen Plasmaumfangs läßt sich die TOKAMAK-Bedingung: $q > 1$ (z. B. typ. 3) auch im Bereich hoher β -Werte einhalten. Die sowohl an die Theorie wie an entsprechende Experimente zu stellende Frage lautet dann: wird unter diesen Bedingungen, also q_{krit} (elongiert) $\approx q_{\text{krit}}$ (Kreis) ein analoges Stabilitätsverhalten gefunden?

Neuere theoretische Arbeiten zeigen zumindest für den Bereich kleinerer Halbachsenverhältnisse (b/a bis etwa 3...4) einen möglichen β -Gewinn $\sim (b/a)^2$ bei dem Kreisfall vergleichbarer Stabilität. Es sollten also β -Werte bis 10 % erreichbar sein. Für höhere bzw. hohe Halbachsenverhältnisse (b/a typ. 4 bis 10) ergeben sich keine Anhaltspunkte für Instabilität im Gegensatz zu den älteren Arbeiten mit unrealistischen Oberflächenströmen. Unter gewissen Voraussetzungen könnte auch hier ein dem Kreisfall vergleichbares Stabilitätsverhalten erreichbar sein. Diese Voraussetzungen sind:

- Die Stromdichte muß an der Oberfläche hinreichend stark gegen Null gehen (wie im TOKAMAK).
- Der Plasmaquerschnitt muß auch für innere Flußflächen entsprechend stark elongiert sein (z. B. race-track-ähnliche Oberfläche).
- Das Plasma muß diamagnetisch sein ($\beta_{\text{pol}} > 1$), wie im TOKAMAK angestrebt.

Die bisher vorliegenden Resultate an den Belt-Pinch-Experimenten (in etwa unter Bedingungen wie sie zuvor postuliert wurden) bestätigen die äußerst positive Annahme: q (elongiert) $\approx q$ (Kreis) bis hin zu Halbachsenverhältnissen b/a von über 10 (und β -Werten von über 50%). Leider ist die Zeitskala – bedingt durch den noch mäßigen technischen Aufwand und entsprechend kleine Temperaturen (im Zeitmittel typisch 25 eV am großen BP-Experiment) – noch auf rund 50 μs (Hoch- β -Phase) begrenzt. Dennoch ist diese Zeitskala bereits um mehr als eine Größenordnung länger als die beobachtete Anwachzeit externer MHD-Moden bei etwas (um 20–30%) kleineren q -Werten. Über die entsprechenden Resultate wird in den nachfolgenden Abschnitten berichtet.

Um zu physikalisch relevanteren Aussagen zu gelangen, müssen verbesserte Plasmaparameter erreicht werden. Einen ersten Schritt stellt hier die gerade (technisch) anlaufende Ausbaustufe BP IIa dar (mit 160 kV Stoßwellenkompression). Hier sollte der Bereich $T \geq 100$ eV zugänglich werden. Mit dem damit zurücktretenden (Verunreinigungs-)Strahlungsproblem dürfte eine deutliche Verlängerung der Zeitskala möglich sein. Der Übergang in den ms-Bereich sollte in einer letzten Ausbaustufe des BP II (IIb) realisierbar sein.

³⁾ Diese Rechenprogramme wurden von B. Marder in LASL Los Alamos, USA, entwickelt.

Laufende Experimente an kleineren Anlagen dienen der physikalischen (Hochspannungsbelt pinch) und technischen (Metallwandgefäß, neue Pulstechniken) Vorbereitung von Belt pinch II b.

In Begleitexperimenten zum Belt pinch werden wichtige Teilprobleme untersucht, wie:

- Vorionisierung bei kleinen Dichten,
- Diagnostikverfahren (Holographie, abs. Strahlungsverlustmessung),
- Fragen von Tearinginstabilitäten sowie Konfigurationsstudien im Bereich kleiner q-Werte ($q \rightarrow 0$).

Die wichtigsten Resultate finden sich in den nachfolgenden Einzelabschnitten.

Die theoretische Untersuchung der MHD-Stabilität des nichtkreisförmigen Querschnitts wurde durch numerische Lösung der idealen MHD-Gleichungen begonnen. / 9/182 /.

2.1 Belt-Pinch II

Das große Belt-Pinch-Experiment (vergl. Jahresbericht 1973) wurde in der ersten Stufe (BP II) zu Beginn des Jahres 1974 in Betrieb genommen. Experimentelles Hauptproblem war die Einstellung des stark nichtkreisförmigen Plasmagleichgewichts bzw. die Ausschaltung der zunächst starken axialen Plasmakontraktion. Der im BP I praktizierte Ausweg, nämlich die schnelle Querschnittsvergrößerung durch Felddiffusion nach entsprechend schneller und starker Abkühlung des Plasmas sollte dabei als Lösung von vornherein ausgeschlossen werden. Dies gelang durch direkten Übergang zum schwach komprimierten Plasma, d. h. durch weitgehende Ausschaltung der adiabatischen Nachkompression. Mit der zur Verfügung stehenden Stoßspannung (40 kV) mußten dabei allerdings verhältnismäßig kleine Toroidalfelder (B_t typ. 0,15 T) in Kauf genommen werden. Mit

Hilfe von geeignet programmierten Vertikalfeldern gelang es, das Plasma für den aus Gründen guter Beobachtbarkeit gewählten Standardfall (Füllichte $3 \cdot 10^{14} = 5 \text{ m Torr}$, D_2) bis in den ms-Bereich in ein toroidales Gleichgewicht zu bringen. Mit den verschiedenen Diagnostikverfahren (Laserstreuung, Interferometrie, diverse interne und externe Sondenmessungen, optische und spektroskopische Beobachtung) wurden dabei für die 50 μsec dauernde Hoch- β -Phase die folgenden Parameter bestimmt:

I_{tor}	\approx	200 kA (Abfallzeit ms-Bereich)
$T_e \approx T_i$	\approx	20 eV (im Zeitmittel) bis 40 eV (Maximum bei geringer adiabatischer Kompression)
$\langle n_e \rangle$	\approx	$7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
$\langle \beta_{\text{tot}} \rangle$	\approx	50 %
$\langle \beta_{\text{pol}} \rangle$	\approx	5...6
2 b	\approx	1,5-1,9 m (variiert)
2 a	\approx	0,14 m
τ_E	\approx	30-40 μs
Sauerstoff	\leq	0,4 %

Das Zeitverhältnis der zwei wesentlichen Größen $\langle \beta \rangle$ und $\langle \beta_{\text{pol}} \rangle$ während der Hoch- β -Phase ist in Abb. 7 wiedergegeben. Das Ende des Hoch- β -Einschlusses (nach typisch $\approx 60 \mu\text{s}$) ist wiederum auf Energieverluste durch Verunreinigungsstrahlung zurückzuführen (Sauerstoffgehalt $\leq 0,4 \%$). Obgleich mit TOKAMAK-Werten vergleichbar, können die Stromdichten des poloidalen und toroidalen Plasmastromes bei den zunächst gewählten Dichten ($n_e \geq 7 \cdot 10^{14}$) nur etwa 30 % der Strahlungsverlustleistung durch ohmsche Heizung decken. Erste Versuche bei deutlich reduzierter Dichte ($n_e \leq 2 \cdot 10^{14}$) scheinen hier einen Gewinn zu bringen. In Verbindung mit entsprechenden theoretischen Untersuchungen zum Diffusions- und Energieverlustproblem / 17 / ergeben sich hier Möglichkeiten zum Plasmaeinschluß bei mittleren $\langle \beta \rangle$ -Werten über längere Zeitskalen und ohne Abfall der Temperatur.

Erste Stabilitätsaussagen für das Hoch- β -Gleichgewicht des gewählten Standardfalls ($U = 40 \text{ kV}$, $p_0 = 5 \text{ m Torr}$) konnten bei sonst festen Parametern durch Variation der Plasmahöhe erhalten werden. Das wesentliche Ergebnis dieser mit Hilfe von Korrekturfeldern durchgeführten Experimente mit veränderlichem b/a ist aus den Schmieraufnahmen der Abb. 8 (A und B), sowie dem in Abb. 9 dargestellten Zeitverlauf des q an der Plasmaoberfläche zu entnehmen. Im Fall A wird bei festgehaltenem Plasmastrom durch ein größeres b/a-Verhältnis für $> 70 \mu\text{s}$ Stabilität erreicht. Im Fall B führt die zunächst nur geringfügig stärkere Kontraktion bei gleichem Plasmastrom zu etwas kleinerem q-Wert und damit (nach etwa 25 μs) in den Bereich schnell anwachsender MHD-Moden. Die zu etwa $\omega_i \approx 2 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ ermittelten Anwachsraten stimmen mit der charakteristischen MHD-Anwachsrates für stromgetriebene Moden $\omega_i \approx B_{p0} a \sqrt{4\pi Q}$ überein.

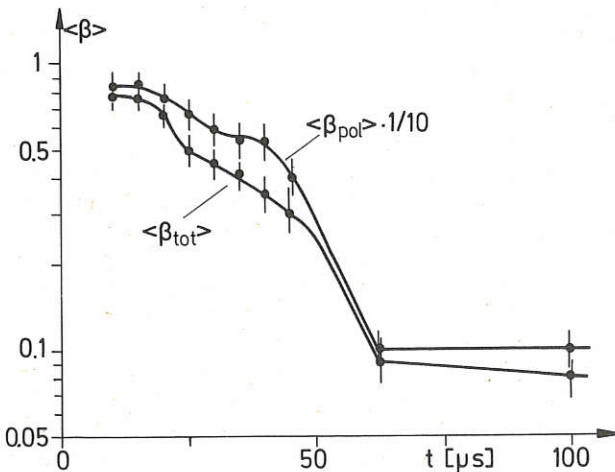
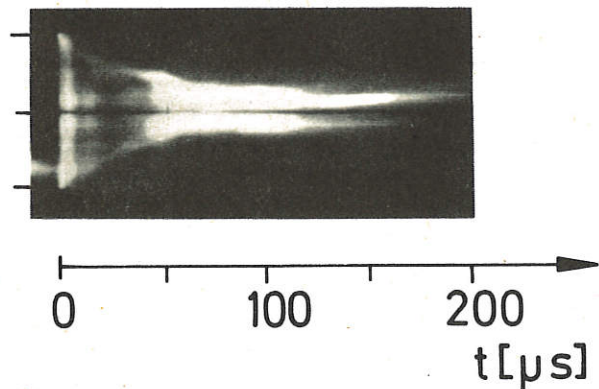
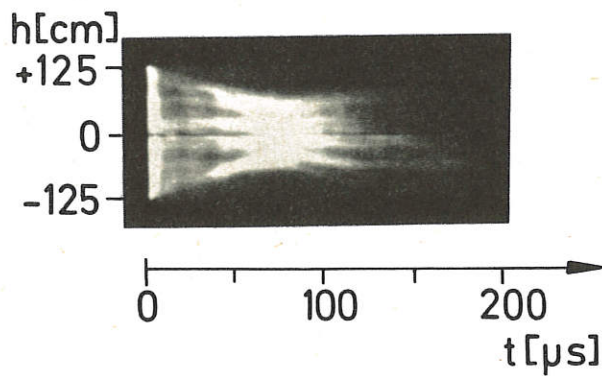
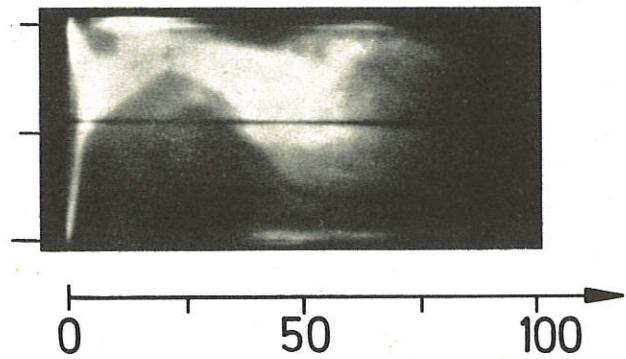
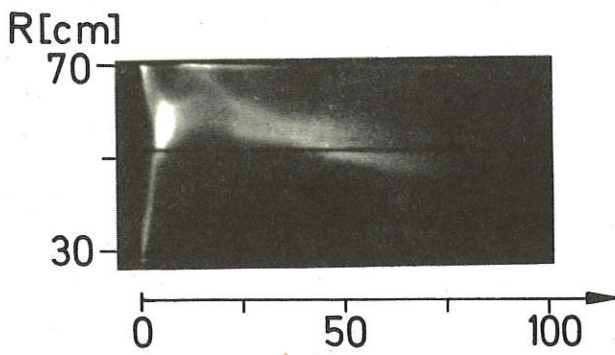


Abb. 7: Gemessener Zeitverlauf von $\langle \beta_{\text{tot}} \rangle$ und $\langle \beta_{\text{pol}} \rangle$.

Die Abbildungen 8 (A und B) sowie 9 siehe Seite 14!



A stabil

B instabil

Abb. 8: Schlierenaufnahmen

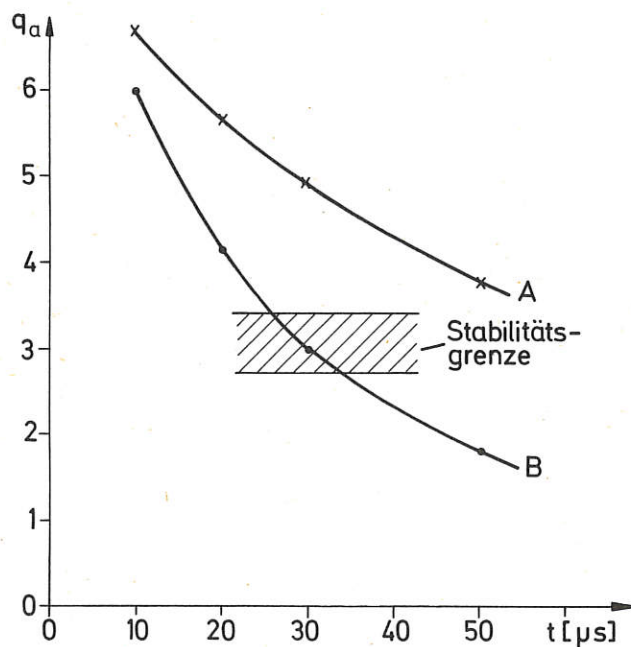


Abb. 9: Zeitverlauf des q_a

2.2 Belt-Pinch I

Mit Inbetriebnahme des BP II stand das kleine Belt-Pinch-Experiment zur Klärung wichtiger Detailfragen zur Verfügung. Eine im Jahre 1974 abgeschlossene Arbeit beschäftigte sich mit dem Problem der Strahlungsverluste als einschlußbegrenzender Faktor. Dazu wurde ein absolut eichbares Widerstandsbolometer mit Empfindlichkeit vom Röntgenbereich bis in das Sichtbare entwickelt. Dieses Bolometer wurde über einen Vakuumstutzen direkt und unter definiertem Raumwinkel der Plasmastrahlung ausgesetzt. Als wesentliches Ergebnis dieser Messungen konnte bestätigt werden, daß der – je nach Art der Vorionisierung – vorhandene Sauerstoffgehalt von 0,5–1,5% (bei knapp 10^{16} cm^{-3} Plasmadichte) zu den beobachteten hohen Energieverlusten (typisch 1 bis 2 eV/ μs) führt. Durch Messung der entsprechenden Strahlungsleistungen ließ sich weiterhin der in der Stoßwellenphase, der in der adiabatischen Kompression sowie während der ohmschen Phase zugeführte Energieanteil bestimmen.

Ein weiteres interessantes Resultat ergab schließlich die Messung des integralen Strahlungsverlustes bei Variation des toroidalen Plasmastromes und damit des q-Faktors. Abb. 10 zeigt den gemessenen Energieverlust aufgetragen

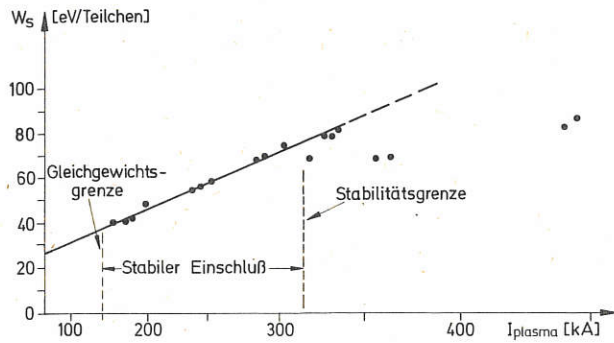


Abb. 10: Abgestrahlte Energie als Funktion von I^2

über I^2 . Der lineare Zusammenhang deutet darauf hin, daß die zugeführte ohmsche Heizleistung zunächst als Strahlung wieder verloren geht. Bei höheren Strömen (und kleineren q -Werten) wird jedoch eine Abweichung von der I^2 -Abhängigkeit sichtbar. Bei diesen q -Werten treten wiederum auch erste massive MHD-Instabilitäten auf, die offenbar zu konvektiven Verlusten führten. Diese werden vom Empfänger nicht registriert. Die Extrapolation der I^2 -Kurve auf Null gibt den durch Kompressionsheizung zugeführten Energieanteil wieder, im gewählten Beispiel etwa 30 eV.

Eine zweite am BP I begonnene Untersuchung beschäftigt sich mit den Möglichkeiten der magneto-akustischen Zusatzheizung des Plasmas. Mit Hilfe eines nach dem Frequenzvervielfacher-Prinzip (nicht-lineares Element: Transformator-Blech) entwickelten Generators (Blindleistung bis 1 GW, Pulsdauer bis 100 μ s, Frequenz 300 bis 700 kHz) wurde dazu das toroidale Grundfeld im Bereich von 3 bis über 10% moduliert. Dabei lag der gewählte Frequenzbereich in der Nähe, aber unterhalb der $m = 0$ -Plasmaeigenfrequenz (etwa 700 kHz). Ziel dieser Untersuchungen ist, — neben mehr technischen Aspekten — den durch das Belt-Pinch-Außenplasma hindurchzutransportierenden Energiebetrag festzustellen.

2.3 Hochspannungs-Belt-Pinch

Mit der zur Verfügung stehenden Umfangsspannung von 250 kV lassen sich durch entsprechend starke Stoßwellenheizung an diesem Belt-Pinch-Experiment Ionentemperaturen im keV-Bereich erreichen. Damit können hier die physikalischen Vorgänge bei starken, stoßfreien Stoßwellen erstmals in toroidaler Geometrie, d. h. ohne die vermutlich starken Einflüsse der axialen Energieverluste untersucht werden. Die wesentlichen technischen Daten dieser Apparatur sind:

Spulenhöhe	110 cm
Außendurchmesser	80 cm
Innendurchmesser	40 cm
U_0	250 kV
E	bis 1 kV/cm
B	bis 0,5 T
Pulsdauer	1 μ s.

Ein funktionsfähiges Crowbarsystem ist vorhanden und kann kurzfristig eingebaut werden. Damit erhöht sich die Pulsdauer ($1/e$ -Zeit) auf über 150 μ s.

Nach technischer Fertigstellung des Experiments im Frühjahr 74 wurde zunächst die Vorionisierung in Betrieb genommen und untersucht. Nach dem im BP II (vergl. Jahresbericht 1973) erprobten Verfahren läßt sich im Fülldruckbereich von 0,5 bis 3 mTorr ein homogenes, weitgehend feldfreies Ausgangsplasma mit einem Ionisierungsgrad bis 60% erzeugen. Als Beispiel zeigt Abb. 11 jeweils mit einem Laserschuß bestimmte radiale Dichteprofile in der Vorionisierungsphase bzw. unmittelbar vor der nachfolgenden schnellen Stoßwellenkompression.

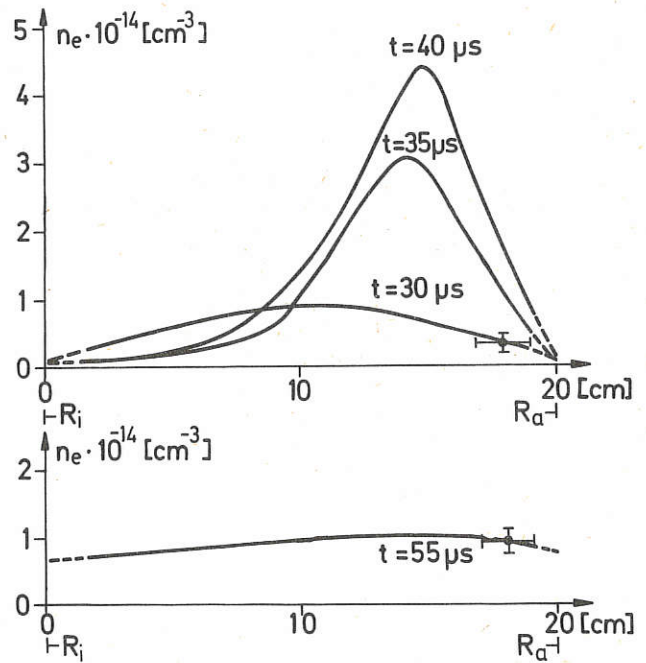


Abb. 11: Radiale Dichteprofile des Vorionisierungsplasmas

Erste Entladungen mit dem Hauptspeicher wurden ohne das Crowbarsystem durchgeführt. Nach optischen Beobachtungen wird das Ausgangsplasma ($n_e \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) in etwa 400 ns auf den halben Durchmesser komprimiert. Die zugehörige kinetische Energie von etwa 700 eV stimmt gut mit Schneepflugrechnungen überein. Nach Untersuchung der Stoßwellenphase kann bei Anwendung des Crowbarsystems auch die Einstellung des KeV-Belt-Pinch-Plasmas in das toroidale Gleichgewicht beobachtet werden. Mit den zu erwartenden Problemen (Erzeugung geeigneter Steuerfelder) ist die Apparatur dann als direktes Vorexperiment für die künftige Belt-Pinch-Entwicklung (BP II b) anzusehen.

2.4 Belt Pinch mit poloidalem Einschlußfeld

An der Anlage ISAR III wurde eine Konfigurationsstudie zum Belt Pinch durchgeführt. An diesem Belt Pinch wird das hohlzylindrische Plasma durch rein poloidale Felder eingeschlossen. Es können aber toroidale Felder zugesetzt und im implodierenden Plasma eingefangen werden. Die Konfiguration ist ein Analogon zum (stabilisierten) toroidalen Z-Pinch, jedoch mit großer Streckung b/a , so daß ein Plasmahohlzylinder entsteht. Macht man auch das Aspektverhältnis groß, so nimmt die Konfiguration den Charakter eines sheet pinch an. Dieser ist in der idealen MHD-Theorie

stabil und erlaubt für die resistiven Instabilitäten Vergleich zwischen Experiment und gut ausgearbeiteten Theorien. Im Falle hinreichender Stabilität hat die Konfiguration fast ideale Eigenschaften für ein Fusionsplasma (z. B. Einfachheit, problemloses Gleichgewicht, hohe Stromdichte, hohes β , axiale Zugänglichkeit).

Im Experiment wurde das Plasma zwischen koaxial angeordneten Θ -Pinchspulen erzeugt und komprimiert (Abb. 12)

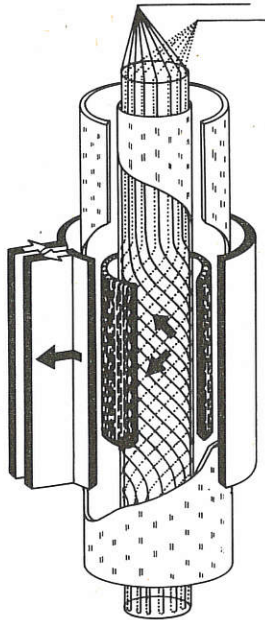


Abb. 12: PF-Belt-Pinch schematisch. Von außen: Äußere Spule, Außengefäß, Plasma, Innengefäß, Innenspule.

Die entstehenden Plasmahohlzylinder hatten ein Aspektverhältnis R/a von 5–15 und eine Streckung b/a von 20–60. Radiales und axiales Gleichgewicht wurde erreicht und für 20–30 μsec aufrechterhalten, wobei die axiale Kontraktion etwa nur 80% der Spulenlänge (75 cm) war. Im untersuchten Bereich der Plasmaparameter ($T_e = 15\text{--}30\text{ eV}$, $n_e \approx 5 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$) zeigten sich Störungen, die relativ langsam anwachsen und schließlich nach typisch 20–30 μsec zur Zerstörung der Konfiguration führten. Es handelt sich sehr wahrscheinlich um resistive $m = 0$ tearing-Instabilitäten. Durch Messung der Dichte und Magnetfeldprofile des Plasmas konnte festgestellt werden, daß die Zeiten für exponentielles Anwachsen der Instabilitäten mit dem Quadrat der Plasmaschichtdicke δ skalieren. Dies ist in guter Übereinstimmung mit der Theorie (Furth, Killeen, Rosenbluth: $\tau_{FKR} = 0,5 \lambda^{-0,4} \delta^2 \tau_e^{0,7}$ wenn die experimentell gefundenen Wellenlängen ($\lambda \approx 30\text{ cm}$) beachtet werden. (Abb. 13). Im Experiment blieb $\lambda = \text{const}$. Dies weist auf einen möglichen Einfluß von Periodizitätsbedingungen hin.

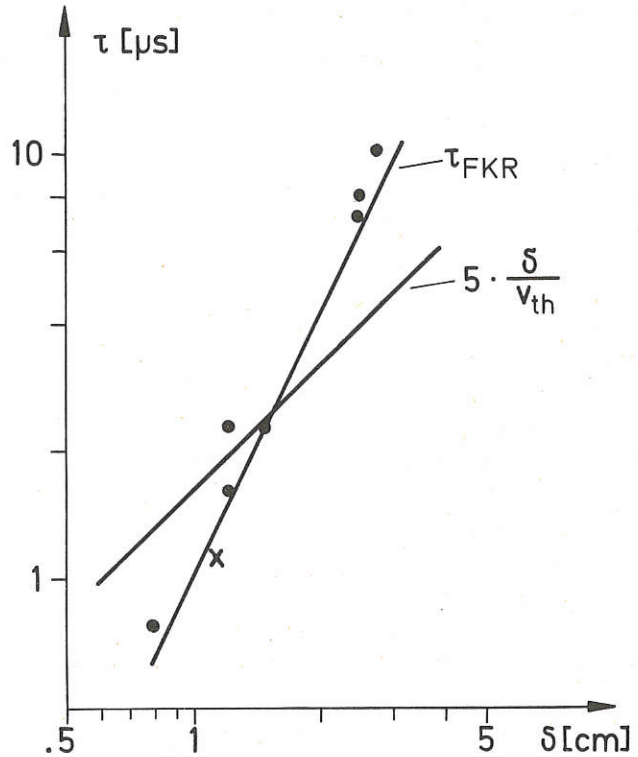


Abb. 13: Anwachzeiten (T_{FKR}) der $m=0$ Tearing Instabilitäten im Vergleich mit gemessenen Anwachzeiten ($0,x$) und mit der fünffachen Schalldurchgangszeit.

Die gefundene Skalierung ($\tau \sim \delta^2$) läßt tolerierbar langsame Anwachzeiten τ in größeren (und heißeren?) Plasmen erwarten. Andere makroskopisch erkennbare Instabilitäten wurden nicht beobachtet. Die Lebensdauer des Plasmas war bei den genannten Plasmaparametern etwa das Zehnfache der charakteristischen Anwachszeit für MHD-Instabilitäten. Experimentelle Aussagen über die Temperaturskalierung der beobachteten Tearing-Instabilitäten und über das Verhalten des PF-Belt Pinches bezüglich anderer instabiler (MHD-)Moden würden eine Fortsetzung der Experimente bei höheren Plasmatemperaturen und längeren Einschlußzeiten erfordern. Im Interesse der Konzentration der Belt Pinch-Arbeiten sind solche Untersuchungen z. Z. nicht möglich.

2.5 Metallgefäße für Hoch- β -Entladungen

Bei zunehmender Größe und Energie schneller magnetischer Kompressionsexperimente scheidet Quarz oder Keramik als Material für die Entladungsgefäße aus Belastungs- und Kostengründen mehr und mehr aus. Es wurden deshalb an einem 15 kJ Thetapinch (Spule $\phi = 10,5\text{ cm}$, $L = 20\text{ cm}$) Untersuchungen über die Verwendbarkeit von geeignet geschlitzten Metallgefäßen durchgeführt. Im Entladungsgefäß aus Quarz wurden Metallstege parallel zum Magnetfeld angebracht, so daß sie die Innenoberfläche bis zu 99% abdeckten. Im Laufe der Untersuchungen wurden bei Deu-

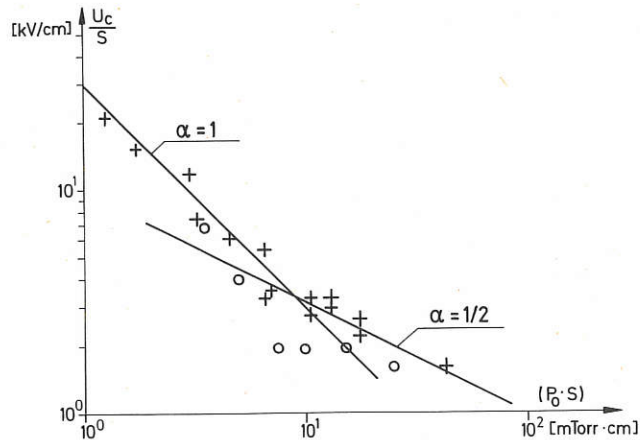


Abb. 14: Kritische Feldstärke als Funktion des Produktes aus Füll-
druck und Spaltbreite.
+ freie Spalte o Spalte mit Plexiglas ausgefüllt

terium-Fülldrücken zwischen $p_0 = 5\text{--}50$ mTorr die Spaltbreiten s zwischen den einzelnen Metallstegen (und auch deren Breite selbst) variiert und jeweils die kritische in den Stegspalten induzierte Spannungsdifferenz U_c ermittelt, bei der gerade noch keine Bogenüberschläge auftraten. Wie in Abb. 14 am Beispiel von V2A-Gefäßen mit der Stegstärke 0,3 cm demonstriert ist, lassen sich alle Meßergebnisse (in Abb. 14 dargestellt durch Kreuze: +) in den folgenden empirischen Zusammenhang bringen:

$$(U_c/s) \cdot (p_0 \cdot s)^\alpha = K = \text{const.}$$

Der Wert von K variiert hier mit dem Material der Stege und deren Stärke (Krümmungsradius im Schlitzbereich). Wie aus Abb. 14 hervorgeht, hängt überdies auch der Exponent α vom verwendeten Fülldruck ab. Er steigt von $\alpha = 1/2$ für den oberen untersuchten Druckbereich ($p_0 > 15$ mTorr) zu niedrigen Fülldrücken hin an, so daß bei $p_0 \approx 5\text{--}10$ mTorr $\alpha = 1$ und damit die in den Stegspalten induzierte kritische Spannungsdifferenz U_c von der Spaltbreite s unabhängig wird.

Das Anbringen von Isolatoren im Schlitzbereich hatte meist geringen Einfluß auf U_c (Glas, Keramik, Protolin). Einige Materialien erwiesen sich als ungünstiger (Plexiglas siehe Abb. 14, Trovidur) – vielleicht aufgrund von Gleitentladungen.

Mit dem Prototyp eines kompakten Entladungsgefäßes aus einer V2A-Protolin Verbundkonstruktion konnte die Verwendbarkeit von Metallwänden für den Theta Pinch erwartungsgemäß ebenfalls demonstriert werden. Komplikationen ergeben sich bei Fülldrücken unterhalb 5 mTorr. Bogenüberschläge sind dann nicht mehr auf dem „kurzen Weg“ über die Stegspalte zu erwarten, sondern auf dem „langen Weg“ zwischen den inneren Metallstegoberflächen.

Diese Probleme werden nun bei vergrößertem Gefäßdurchmesser im Druckbereich $1 \leq p_0 \leq 5$ mTorr behandelt. Die Befunde der ersten Untersuchungen (Fe Linien und end-on Framing Bilder) deuten an, daß die Stegspalte zunächst durch relativ breite, diffuse Plasmabrücken auf dem „langen Weg“ kurzgeschlossen werden, welche sich erst anschließend (nach etwa $1 \mu\text{sec}$) in den Stegspalten selbst zu Überschlagsbögen konzentrieren, wie sie für $p_0 \geq 5$ mTorr sofort auftreten. Zur Behebung der Schwierigkeiten soll nun eine Variation der Stegbreite versucht werden.

Bereich Niedrig-Beta-Stellaratoren

(Dr. Günter Grieger)

Die in den vergangenen Jahren eingeleitete Konzentration der Aktivitäten des Stellarator-Bereichs – ausgerichtet auf die vor uns liegende Inbetriebnahme der Apparatur WENDELSTEIN VII – hat dazu geführt, daß im Berichtsjahre nur an den beiden kleineren Stellaratoren W II A und W II B experimentelle Arbeiten durchgeführt wurden, während sich die dazu korrespondierenden Großapparaturen WEGA und W VII dem Ende ihrer Aufbauphase näherten.

Der Aufbau des W VII, dessen Arbeitsbereich dem eines Fusionsreaktors näher sein wird, als dies in bisherigen Stellaratoren möglich ist, ging trotz mancher technischer Schwierigkeiten, Lieferverzögerungen und personeller Engpässe recht zügig voran. Nach erfolgter Montage des Stützgerüsts und des Hauptfeldmagneten befindet sich W VII in einer Phase technischer Tests, welche gegen Ende des Jahres 1975 in die physikalische Inbetriebnahme münden wird. Die Entscheidung, zunächst das bereits vorhandene kleinere Rohr (W VII A) mit helikalen Wicklungen zu versehen und in die Apparaturen W VII einzubauen, wurde erweitert um die Planungsarbeiten für Multipol-Magnetspulen, welche in dem Zwischenraum zwischen Vakuumgefäß und Hauptfeldspulenkranz untergebracht werden und Experimente zur Erzeugung eines „Magnetischen Limiters“ ermöglichen.

Alle anderen Arbeiten des Bereichs dienen der Vorbereitung auch des langfristigen experimentellen Programms am W VII. So wurde im W II B die Anwendung wichtiger Meßverfahren vorbereitet und erprobt. Die Untersuchungen zur Ohmschen Heizung eines Stellarator-Plasmas wurden fortgesetzt und von bisher Wasserstoff (max. El. Temp. 300 eV) auch auf Helium ausgedehnt, wobei sich die Ergebnisse in die bei Wasserstoff beobachteten Abhängigkeiten einreihen lassen. In der zweiten Jahreshälfte konzentrierten sich die Untersuchungen auf die auch für Tokamak-Entladungen aktuelle Frage des Verhaltens von Verunreinigungen, welche durch vakuumspektroskopische Messungen ergänzt wurden.

Der Stellarator W II A dient dem Studium der Plasmaerzeugung und -heizung durch Einkoppelung von Hochfrequenzleistung in das Plasma. Gemeinsam mit der ERM (Ecole Royale Militaire, Bruxelles) wurden über den Frequenzbereich von TTMP bis zu LH (Lower Hybrid Frequency), d. h. von 10 MHz bis 200 MHz, die „Welleneigenschaften“ in toroidaler Geometrie bei relativ kleinen HF-Leistungen untersucht, um experimentell das am besten geeignete Heizverfahren für Stellarator-Plasmen herauszufinden. Es ist gelungen, durch Anregung von Elektronen-Plasma-Wellen im Bereich bis 200 MHz, welche in das zunächst vorhandene Füllglas eingekoppelt werden, eine wirksame Hochfrequenz-Plasmaerzeugung zu bewerkstelligen. Die maximal erreichbare Dichte ist durch die „Untere Hybriddichte“ bestimmt, im vorliegenden Fall also nahe $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

Die Ergebnisse des W II A werden in das experimentelle Programm des in Aufbau befindlichen Stellarators WEGA einfließen, mit welchem Hochfrequenz-Heizexperimente hoher Leistung in Grenoble gemeinsam mit dem französischen Institut C.E.N. (Grenoble) und dem belgischen Institut ERM (Bruxelles) durchgeführt werden sollen. Der Kern des Stellarators WEGA wird vom IPP gebaut, während der Ohmsche Heiztrafo sowie alle Stromversorgungs-, Hochfrequenz- und Laborentwicklungen sowie die meisten Diagnostikeinrichtungen vom C.E.N. bereitgestellt werden. Ziel der Arbeiten ist die Untersuchung der Hochleistungs-HF-Heizung im toroidalen Plasma, auch im Hinblick auf deren Anwendung im W VII B. Die ersten Experimente werden zunächst im Tokamak-Betrieb in einem provisorischen Vakuumgefäß durchgeführt.

Zur Vorbereitung des Einschusses energetischer Neutralteilchen läuft die Erprobung und Weiterentwicklung stationärer Teilchenquellen in Zusammenarbeit mit dem Institut in Fontenay-aux-Roses bei Paris. Die bestehende Anlage (~ 1 A, 15 keV) wurde erfolgreich eingesetzt bei Oberflächenuntersuchungen. Zum Zweck der Vorionisierung und der Plasma-Erzeugung befindet sich ein Injektions-system für W VII A im Aufbau.

Der für den Einsatz im W VII B vorgesehene Cluster-Injektor wurde von der Gesellschaft für Kernforschung (GfK) in Karlsruhe bei der Industrie in Auftrag gegeben. Vorexperimente zur Ionisation und Beschleunigung der Cluster verliefen erfolgreich.

1. STELLARATOR W II A

(G. Müller, P. Javel, A. van der Houven van Oordt, R. R. L. Weynants¹⁾)

Das gemeinsam mit der Ecole Royale Militaire (E. R. M.), Brüssel, vorbereitete HF-Spektroskopie-Experiment im WENDELSTEIN Stellarator W II A konnte im Frühjahr 1974 begonnen werden. Anfängliche Schwierigkeiten in der Erzeugung des Target-Plasmas hatten zur Folge, daß die ursprünglich geplante Breite dieses Vorexperiments zur HF-Plasmaheizung auf einen Frequenzbereich nahe bis weit über der „Unteren Hybriden Resonanz“ eingeengt werden mußte. In diesem heute viel diskutierten typischen Plasmaheizungsgebiet wurden Einzelphänomene experimentell untersucht, die für künftige HF-Plasmaheizung bei großer Leistung in den im Bau befindlichen großen Stellaratoren und Tokamaks von Bedeutung sind. Die wichtigsten Betriebsparameter des Experiments sind:

- Felder: $B_t \approx 6$ kG bei $i^{(2)} < 0,2$
- Wasserstoffplasma mit
 - $n: 5 \times 10^{10}$ bis 7×10^{11} cm⁻³
 - T_e bis 15 eV
 - T_i bis etwa 8 eV
 - Plasmavolumen: 10 Liter
 - H₂ – Gasdrucken: $5 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ Torr
 - bei Restgasdruck: $\leq 2 \cdot 10^{-7}$ Torr
- Hochfrequenz: 10 MHz – 200 MHz, bis maximal 200 Watt

1.1 HF-Antenne

Ursprünglich sollte das Experiment an einem durch im S-Band betriebene L-Spulen erzeugten, stationären Targetplasma mit Dichten $n > 1 \cdot 10^{12}$ cm⁻³ durchgeführt werden. Jedoch konnte mit dieser Methode selbst mit hoher Mikrowellenleistung bis 800 Watt und weiteren Zünderleichterungen kein Plasma erzeugt werden. Als eine geeignete Alternativ-Plasmaquelle erwies sich eine $m = 0$ Ringstruktur (2 Metallringe mit Durchmesser und im Abstand von 10 cm) bei Betrieb im Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 200 MHz, jedoch nicht im S-Band. Die benutzte Struktur zeigte keine ausgeprägten Resonanzen und gute Zündbedingungen. Die Effektivität der HF-Einkopplung ins Plasma stieg mit wachsender Frequenz (reflektierte HF-Leistung $< 10\%$ bei 50 MHz und $\ll 1\%$ bei über 150 MHz) und zeigte sich nahezu unabhängig davon, ob ein Einzelring oder die Doppelringstruktur symmetrisch oder unsymmetrisch betrieben wurde.

Da diese Plasmaquelle bei Frequenzen des eigentlichen HF-Experiments arbeitet, wurde beides – Plasmaproduktion und die HF-Studie durch HF-Einkopplung ins Plasma – über diese eine Antenne durchgeführt. Diese Methode erschwerte zwar die Experimentierbedingungen als Folge der starken Wechselwirkung von Plasmaproduktion und Wellenausbreitung bei gleicher Frequenz, verringerte jedoch auch Interpretationsschwierigkeiten der experimentellen Resultate.

¹⁾ Ecole Royale Militaire, Laboratoire de Physique des Plasmas, Brüssel

²⁾ i entspricht $i/2\pi = t$

³⁾ siehe Seite 20 in 1.2.2 (Das Plasma-Wellenfeld) – P. M. Bellan und M. Porkolab, Phys. of Fluid: 17, 1592 (1974)

1.2 Resultate

1.2.1 Phänomenologisches Verhalten des Plasmas

Die mit Interferometer integral und mit Langmuir-Sonden lokal gemessene Dichte des Wasserstoffplasmas steigt mit wachsender HF-Leistung zunächst an und sättigt sich bei Annäherung der „Lower Hybrid Frequenz“ an die Heizfrequenz. Eine weitere Steigerung der HF-Leistung hat eine Verbreiterung des ursprünglich besselfunktionsartigen, radialen Profils zur Folge, bis sich ein rechteckförmiges Profil im gesamten, durch die Limiter begrenzten Innenraum ausgebildet hat. Nochmalige Leistungssteigerung bewirkt Aufheizung des Plasmas (insbesondere Ionenheizung) in der Plasmarandschicht. Spitzendichten von $7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ wurden bei der höchsten zur Verfügung stehenden Heizfrequenz von 200 MHz bei 200 Watt erreicht. Unter typischen Heizbedingungen konnten Ionen auf Temperaturen von 1 eV bis etwa 8 eV und Elektronen auf 5 eV bis 15 eV aufgeheizt werden.

1.2.2 Das Plasma-Wellenfeld

Lokale Messungen des komplexen Wellenfeldes im Plasma längs einer Torushälfte – von der Quelle an – haben die Übertragbarkeit bisheriger Rechnungen³⁾ zur Ausbreitung kalter Elektronen-Plasmawellen auf das stark inhomogene Plasma in toroidaler Geometrie bestätigt. Die HF-Energie breitet sich kegelförmig in dünnen konzentrischen Schichten, den sogenannten „resonance cones“, von der Ring-Antenne am Plasmarand längs der Plasmasäule und ins Plasmazentrum aus, wobei der „cone“-Winkel bezogen auf B_t in Übereinstimmung mit der theoretischen Voraussage mit der Frequenz und fallender Dichte wächst und vernachlässigbar klein wird, wenn der „cone“ sich der „Lower Hybrid“ (LH)-Schicht annähert. Sehr kurze Dämpfungslängen wurden gefunden, so daß der „cone“ unter typischen Bedingungen seine HF-Energie bereits abgegeben hat, bevor er die LH-Schicht erreicht. Dies ist von einiger Bedeutung im Zusammenhang mit Spekulationen über „Mode conversion“ nahe der Hybrid-Schicht, mit anschließender Plasmaheizung.

1.2.3 Plasma-Heizung

Auch ohne die eben erwähnte „Mode conversion“ wurden typische Bedingungen für vorzugsweise Plasmaerzeugung und vorzugsweise Plasmaheizung gefunden, die bereits in Kap. 1.2.1 genannt wurden.

Messungen der Elektronentemperatur (mit Langmuir-Sonden) und Ionentemperaturen (bisher nur in der Plasmarandschicht meßbar mit elektrostatischem Analysator) zeigen sehr deutlich die Bedeutung der „resonance cones“ für Plasmaerzeugung und Aufheizung.

Maximale Elektronentemperaturen werden in der Plasmaachse gefunden, solange die Plasmadichte genügend klein bzw. die Heizfrequenz genügend hoch ist, d. h. daß der „cone“, bevor er seine Energie verloren hat, das Plasmazentrum durchdringt. Mit wachsender HF-Leistung (d. h. wachsende Dichte) bzw. mit abnehmender Frequenz nähern sich „Lower Hybrid“- und Heizfrequenz. Der „cone“ wird mehr und mehr in das Plasmarandgebiet abgedrängt, wo er seine Energie abgibt, so daß die Stellen maximaler Elektronentemperatur aus der Achse in den Randbereich wandern, während die Elektronentemperatur im Plasma-Zentrum merklich absinkt.

1.2.4 Parametrischer Wellenzerfall

Untersuchungen des Frequenzspektrums im Plasma zeigen die Existenz eines parametrischen Wellenzerfalls im Bereich der „cones“, bei dem die Elektronenplasmawellen mit der eingekoppelten Frequenz f_{e1} in eine Ionenzyklotronwelle mit einer gegenüber der Ionenzyklotronfrequenz leicht erhöhten Frequenz f_{ci} und eine 2. Elektronenplasmawelle der Frequenz $f_{e2} = f_{e1} - f_{ci}$ zerfällt. Wegen der hohen Felder im „resonance cone“ und des fokussierenden Effekts bei der „cone“-Ausbreitung wurde ein „Threshold“ bei geringen HF-Leistungen von einigen Watt gemessen. Radiale Amplitudenprofile lassen auf starke Lokalisierung der Pumpwelle mit ihren Tochterwellen schließen.

Dieser parametrische Zerfall scheint auch für den Heizmechanismus von Elektronen und insbesondere von Ionen von Bedeutung zu sein. Aus dem linearen Zusammenhang zwischen gemessener Ionentemperatur und gemessener Energie in der Ionenzyklotronwelle darf geschlossen werden, daß die Ionenzyklotronwelle wesentlich zur Ionenaufheizung beiträgt.

Ferner konnte die Gültigkeit des „Manley Rowe“-Gesetzes in Gegenwart starker Wellendämpfung experimentell durch Messungen der Energieaufteilung in die Tochterwellen beim parametrischen Zerfall bestätigt werden.

2. STELLARATOR W II B

(H. Renner, H. Hacker, C. Mahn, G. Pacher, S. Rehker, H. Ringler, E. Würsching, E. Hinnov¹⁾, G. Voronov²⁾)

2.1 Übersicht

Schwerpunkt der Untersuchungen war das Einschlußverhalten des WENDELSTEIN-II-B-Stellarators. Die Darstellung des Energieeinschlußverhaltens mit τ_E bei H_2 mit ohmscher Heizung erlaubte einen quantitativen Vergleich mit Ergebnissen von anderen Stellaratoren und Tokamaks. Als dominanter Verlustmechanismus erscheint darin die pseudoklassische Elektronenwärmeleitung, die den Wärmetransport mit dem Poloidalfeld korreliert.

Allerdings liegen die Teilcheneinschlußzeiten um den Faktor 5–10 höher als die Energieeinschlußzeiten. Der Teilchentransport zeigt eine andere Abhängigkeit von den experimentellen Parametern, Teilchendichte(n), Temperatur (T) und Rotationstransformation (ι) und nähert sich dabei quantitativ Erwartungswerten nach der neoklassischen Theorie im intermediate regime.

Für den Verlust der Ionenwärme erscheint als dominierender Vorgang bei der relativ hohen Neutralgasdichte $n_0 \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ die Abfuhr über charge-exchange Neutrale. Die experimentellen Ergebnisse stimmen gut mit solchen Abschätzungen überein.

Um diese Fakten kritisch zu untersuchen, wurden Heizexperimente in He durchgeführt. Die beobachtete geringe Gasaufzehrung, das andersartige Recycling-Verhalten und die höhere Kernladungszahl $Z = 2$ gaben den Anstoß zu dieser Wahl.

Besonderes Gewicht wurde auf die Frage der Bedeutung von Verunreinigungen für die Entladung gelegt.

¹⁾ Princeton, USA

²⁾ Lebedev Inst. Moskau, UdSSR

Die quantitative Spektroskopie an Resonanzlinien der Verunreinigungsatome erlaubt eine Angabe der Strahlungsverluste und Teilkonzentrationen.

Für die Energiebilanz ist die Kenntnis des Runaway-Anteils wichtig. Verschiedene Maßnahmen ließen das Auftreten hochenergetischer Elektronen stark reduzieren.

Im Sommer 1975 wird das Programm Ohmsche Heizung im W II B abgebrochen. Der W II B wird für Einschlußexperimente mit LASER-PELLET-Plasmaerzeugung umgebaut werden.

2.2 Ohmsche Heizung in H₂, He

Die Ergebnisse des Einschlußverhaltens des Stellarators W II B mit He-Plasmen stimmen mit den H₂-Experimenten überein. In einem Bereich $kT_e = 50-300$ eV, $n_e = 2 \cdot 10^{12}$ bis $1,5 \cdot 10^{13}$ cm⁻³ konnte ein stabiles Plasma erzeugt und gehalten werden. Der Einfluß des schlechten Einschusses bei rationalen Werten der Rotationstransformation $1/4, 1/3$ am Rand des Plasmas wird mit einem ausreichenden Shear bei $\iota_p/\iota_0 > 1$ (ι_p Rotationstransformation, erzeugt vom Plasmastrom I_p, ι_0 Rotationstransformation vom helischen Strom) und Anpassung des Vertikalfeldes B_z beschränkt. $\iota = \iota_0 + \iota_p = 0.5$ ist dabei als Grenze für den Plasmastrom I_p anzusehen. Abb. 1 gibt den Bereich für H₂ und He. Die Trennlinien markieren die Grenzübergänge: stoßdominiert – Zwischenbereich – stoßfrei nach der neoklassischen Theorie für $Z_{eff} = 2$.

Das Verfahren zur Vorionisation mußte für He modifiziert werden. Nach vergeblichen Versuchen mit L-Antennen im S-Band war eine Einkopplung von HF 98.3 MHz entspre-

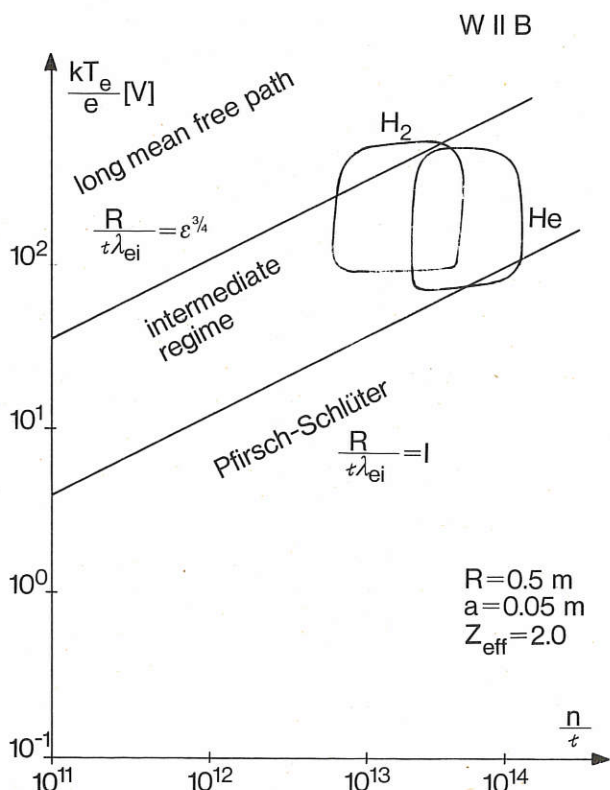


Abb. 1: Der Parameterbereich des WII B mit Ohmscher Heizung für He- und H₂-Entladungen.

chend Experimenten von B. Hooke (Bull. Am. 1973) erfolgreich. Bei einer Senderleistung von 300 Watt wurden Startdichten bis zu 10^{12} cm⁻³ mit Magnetfeld und Rotationstransformation steigend erreicht.

2.2.1 Energiedichte $n_e kT_e$

Die Energiedichte, die bei einem Heizstrom I_p erreicht wird, folgt quantitativ der Beschreibung, die allein „pseudoklassische Wärmeleitung“ als Verlust annimmt:

$$X_e = C^2 \cdot \rho_{ee}^2 \cdot v_e$$

C^2 Konstante ρ_{ee} Gyroradius der Elektronen im Poloidalfeld $B\theta$ v_e Stoßfrequenz	}	$nkT_e = \frac{1}{\alpha CR} \iota \cdot I_p \cdot B_0$ α physikalische Konstante R Torusradius B_0 Hauptfeld
--	---	---

Als Beispiel sind in Abb. 2 zeitliche Entwicklungen von n_e, kT_e für zwei Entladungen in He und H₂ gegenübergestellt. Trotz der Verschiedenheit in Dichte und Temperatur zeigt Abb. 3, daß die Energiedichte proportional $\iota \cdot I_p$ verläuft. Eine erstaunliche Übereinstimmung ergibt sich für die

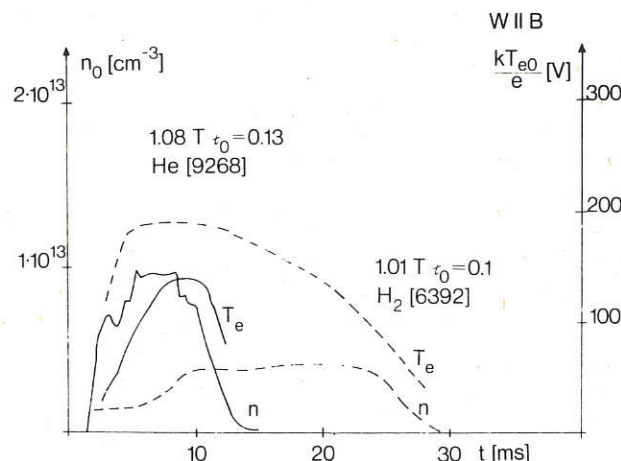


Abb. 2: Verlauf von Elektronendichte(n) und Elektronentemperatur (T_e) von He- und H₂-Entladungen

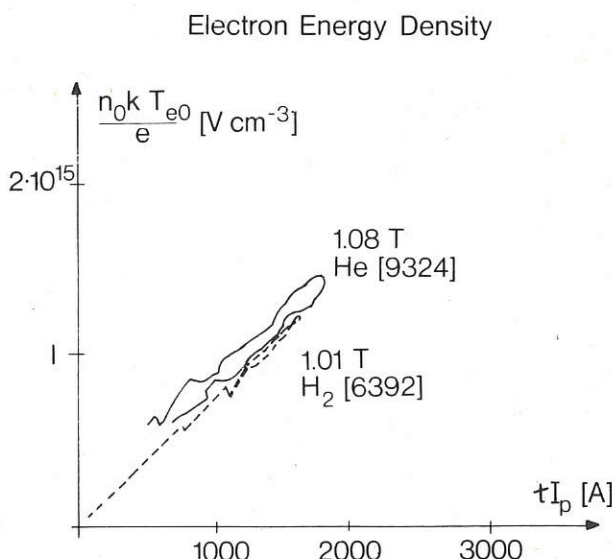


Abb. 3: Energiedichte - abhängig vom $\iota \cdot I_p$ für die in Abb. 2 gegebenen Entladungen.

Tabelle 1:

$\chi_e = C^2 q_{e0}^2 v_{ei}$		$nkT_e = \frac{1}{\alpha RC} \tau_p \cdot J_p \cdot B_0$	
<u>W I I B</u>	He H ₂	<u>URAGAN</u>	He
<u>TOKAMAK</u> *			
$\frac{1}{\alpha RC} = (11 \pm 02) \cdot 10^8$		$\frac{1}{\alpha RC} \tau = 2 \cdot 10^7 \left[\frac{eV}{cm^{-3} \cdot \text{A} \cdot G} \right]$	
R = 0.5m		R = 1.9m	$\beta_e = 0.5$
$C^2 = 7$		$\tau = 0.8$	
		$C^2 = 7.8$	$C^2 = 4 - 6$

Vergleich der Konstanten C² für W I I B, URAGAN und „TOKAMAK“

Konstante C² aus einem Vergleich experimenteller Ergebnisse: W I I B, URAGAN, „TOKAMAK“. Die Tabelle 1 gibt C², bestimmt aus physikalischen Konstanten, Geometriefaktoren und experimentellen Werten. Dabei wird kein „freier“ Parameter zur Anpassung benutzt.

2.2.2 Energieeinschlußzeit τ_E

Die Energieeinschlußzeit τ_E folgt zu $\tau_E \sim l/l_p \cdot \sigma \sim (1 \pm v_0/l_p) \cdot \sigma$ mit σ als Leitfähigkeit. Der Term $\pm v_0/l_p$ charakterisiert den „Stellatoreffekt“ auf Grund des Einschlußvermögens mit äußerer Rotationstransformation v_0 .

Für die oben gegebenen zwei Entladungen stellt Abb. 4 normierte Einschlußzeiten gegen die Temperatur kT_e dar.

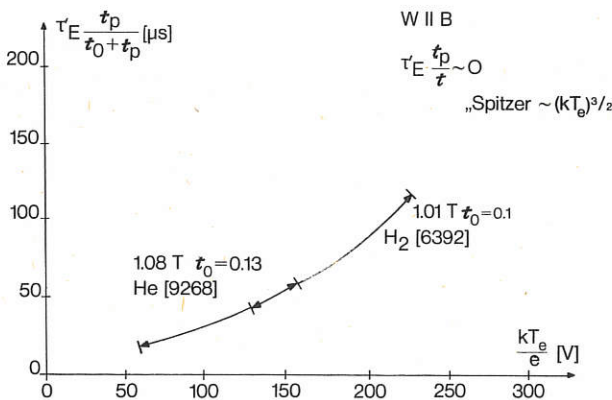


Abb. 4: Einschlußzeiten in Abhängigkeit von kT_e für He- und H₂-Entladungen nach Abb. 2.

Aus dem Verlauf ist zu sehen, daß σ klassisch nach $(kT_e)^{3/2}$ angegeben werden kann. Z_{eff} ist für H₂ und He gleich und kann mit $Z_{eff} \approx 2$ gut angenähert werden.

Das Verhältnis v_p/v variiert zwischen 0.3–0.8 im dargestellten Bereich.

2.2.3 Verunreinigungen

An dem niedrigen Wert von Z_{eff} und der Empfindlichkeit der Entladung auf geringe Ne-Zugaben deutet sich an, daß der

Verunreinigungsanteil relativ gering sein sollte. Allerdings kann ein hoher Runaway-Strom eine gute Leitfähigkeit vortäuschen. Quantitative Messungen der Konzentrationen nach spektroskopischen Untersuchungen, wie sie in Abb. 5 an einer Entladung wiedergegeben werden, stützen die Aussage, daß die Entladung sehr „sauber“ abläuft: Konzentrationen von N, O, C bleiben weiter unter 1%. Materialien mit höherem Z, z. B. Fe, W, konnten nicht nachgewiesen werden.

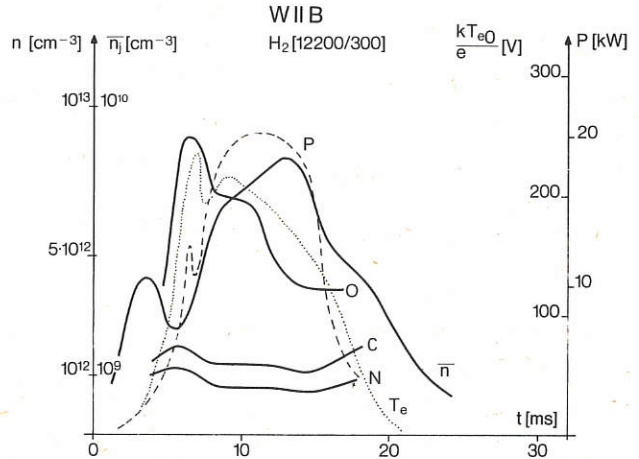


Abb. 5: Ohmsche Heizleistung (P), mittlere Elektronendichte (\bar{n}), Elektronentemperatur (T_e) und Ionendichten von O, C und N

Somit bleibt auch der Strahlungsverlust durch Linienstrahlung, der integral zu max. 1–2 kW abgeschätzt werden kann, klein gegen den Gesamtverlust von hier circa 20 kW. Die Kopplung der Ionen an die Elektronen übernimmt ebenfalls nur etwa 1 kW.

2.2.4 Runaway-Elektronen

Bisher ist es noch nicht gelungen, quantitative Aussagen über den Anteil und den Energieinhalt von hochenergetischen Runaway-Elektronen zu machen. Durch verschiedene Maßnahmen konnte die Röntgenintensität harter Strahlung variiert werden:

- So zeigt sich eine Reduktion bei Erhöhung der Startdichte bei geeigneter Vorionisation.
- Durch kurzzeitige Anwendung von Störfeldern, die die magnetischen Flächen aufbrechen, wird (besonders in der Anfangsphase) der Runaway-Anteil stark verkleinert.

Da diese Maßnahmen die Energiedarstellung kaum modifizieren, läßt sich vermuten, daß zumindest hochenergetische Runaways die Energiebilanz kaum beeinflussen.

Eine starke Entartung der Energieverteilung könnte als wesentlicher Fehler bei der Bestimmung der Energiedichte (Temperatur über Laserstreuung bestimmt) eingehen. In Zusammenarbeit mit Dr. Sesnic wurden Messungen der weichen Röntgenstrahlung durchgeführt, um eine Aussage über die Energieverteilung zu erhalten.

2.2.5 Teilcheneinschlußzeit

Für einige Entladungen wurde die Teilcheneinschlußzeit (τ_p) bestimmt. Dazu wurden die Ionisationsraten aus quantitativen Messungen von He I-, He II-Linienintensitäten ge-

wonnen. Der Elektronenanteil der Verunreinigungsatome bedingt eine geringfügige Korrektur. Mit Einschlußzeiten von 1 ms verändern diese Messungen nicht das Bild von den detaillierten Untersuchungen an H₂-Entladungen. Dabei ergab sich eine Annäherung an das neoklassische Bild im Intermediate Regime mit $\tau_p \approx (\nu \cdot B_0) / (kTe)^{3/2}$.

Abb. 6 gibt Messungen τ_{exp} in einer normierten Darstellung für verschiedene Felder B₀, zum Teil mit $\nu_0 - \nu_p$: Stromrotationstransformation subtraktiv zur äußeren Rotationsstransformation ν_0 .

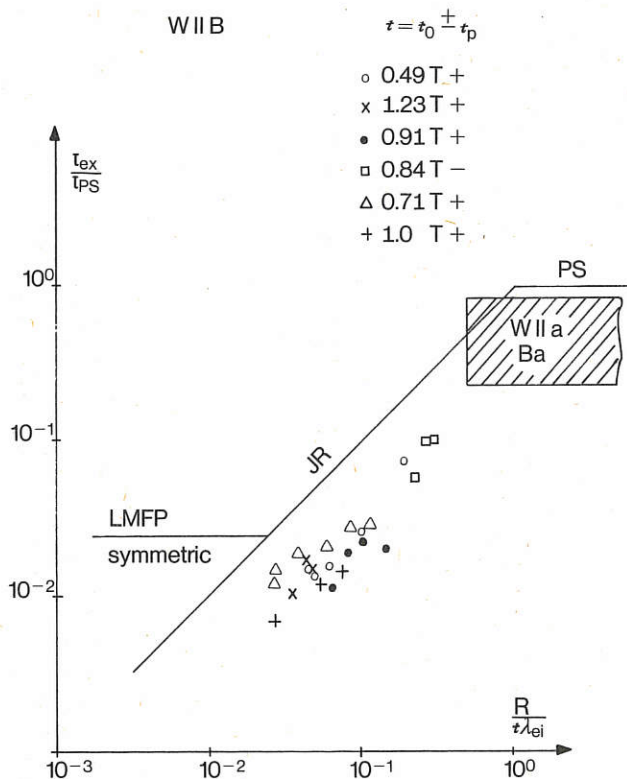


Abb. 6: Normierte Teilcheneinschlußzeiten für verschiedene Hauptmagnetfeldstärken (B₀). Die Kurven geben die theoretischen Erwartungswerte.

3. STELLARATOR WEGA

(IPP-Garching: J. G. Wegrowe, K. Baker, C. Mahn, W. Ohlendorf, G. Pacher, H. Pacher

CEN-Grenoble¹⁾: G. Ichtchenko, J. Blanc, P. Blanc, W. Hess, P. Lallia, I. K. Nguyen, G. Schenk)

Die Zusammenarbeit zwischen dem IPP und dem CEN-Grenoble für den Bau und den Betrieb des Stellarators WEGA sowie die Mitwirkung der E.R.M., Brüssel, wurde im Berichtsjahre durch einen Vertrag geregelt. Das Hauptziel des Experiments WEGA ist, die Heizung eines ohmisch geheizten Ausgangsplasmas durch Hochfrequenzfelder zu studieren.

¹⁾ Centre d'Etudes Nucleaires, Grenoble

WEGA ist ein Stellarator mittlerer Größe (großer Radius 72 cm, Plasmaradius — 16 cm, Hauptmagnetfeld 1,4 T — später 2,5 T — Rotationstransformation vom Stellaratorfeld: 0,3 bei 1,44 T, Fluß im Eisentransformator 0,4 Wb ohne Vormagnetisierung). Mit diesen Werten zeigten Berechnungen der Plasmaparameter, daß bei einer ohmschen Heizleistung von 50 bis 100 kW, Elektronentemperaturen zwischen 1 und 2 keV und Ionentemperaturen zwischen 0,25 und 0,5 keV zu erwarten sind. Mit einer Temperaturerhöhung um einen Faktor 2 kann gerechnet werden, wenn die im Plasma zusätzlich absorbierte HF-Leistung 200 kW beträgt.

Das Experimentierprogramm sieht vor, nach einer Phase des Studiums des Einschlusses, HF-Energie in der Nähe der unteren Hybrid-Frequenz einzukoppeln. Dabei sollen für diese Heizmethode Wirkungsgrad, Absorptionsmechanismus und Einfluß auf die Einschlußeigenschaften untersucht werden, da sie sich bereits bei kleineren Maschinen als wirksam erwiesen hat und wegen ihrer technischen Realisierbarkeit als mögliche Methode für die Heizung der nächsten Maschinengeneration in Betracht gezogen wird. Die Montage des Kerns der Maschine — d. h. der Teile unter Garchinger Verantwortung — hat im Herbst 1974 mit dem Aufbau des Vakuumsystems und des Luftkissentransportsystems begonnen. Die Hauptmontagephase soll bis Sommer 1975 abgeschlossen werden, da alle Komponenten mit Ausnahme des Torus mit Helix bis März 1975 fertiggestellt werden sollen.

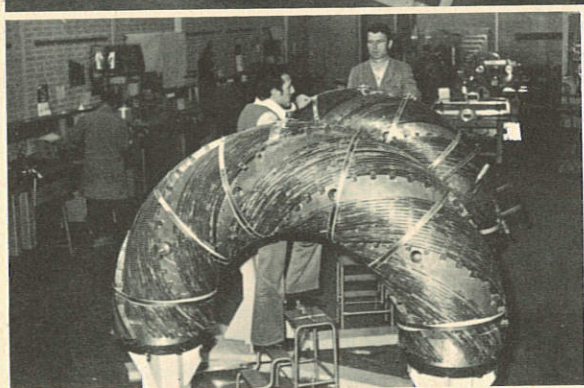
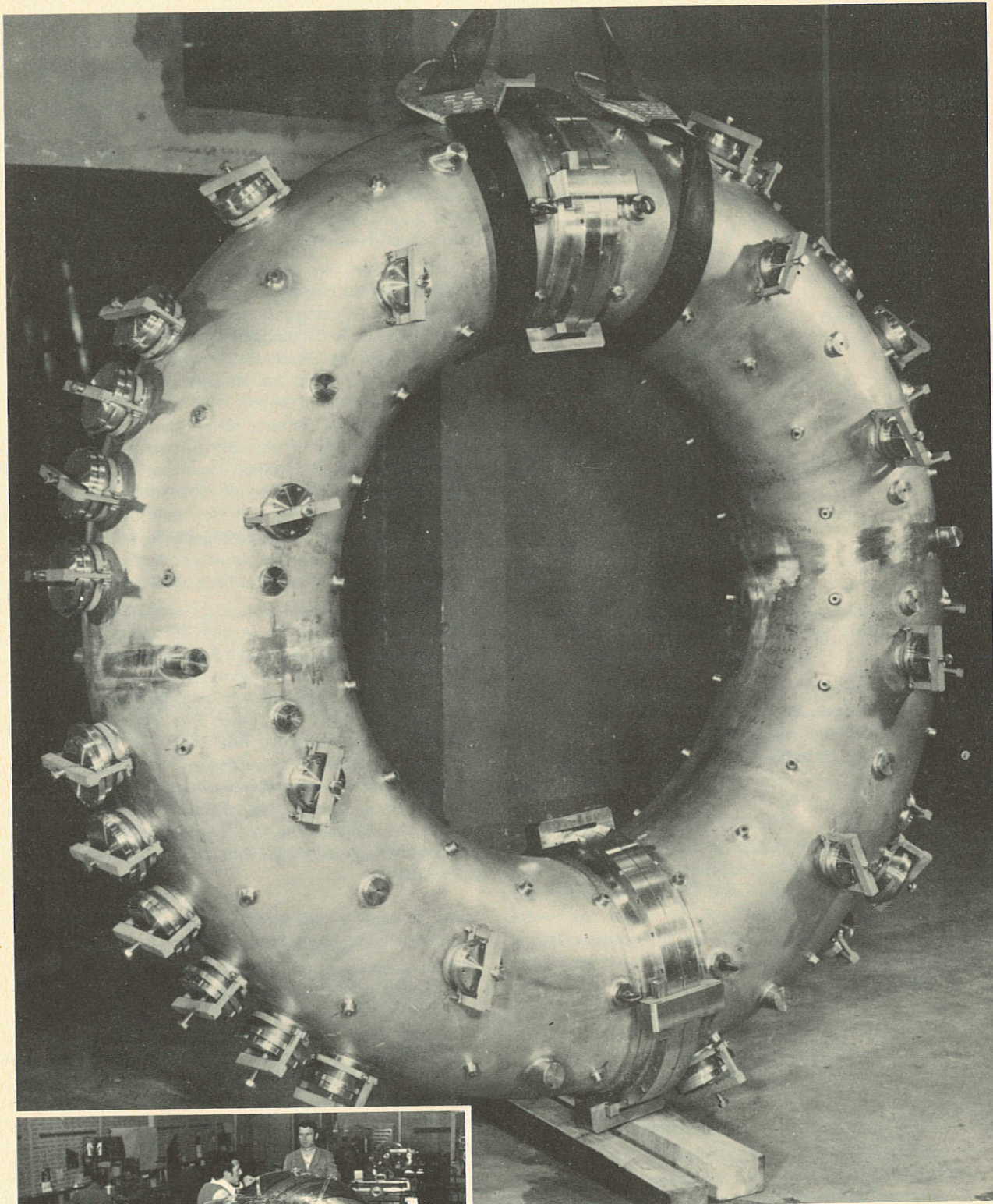
Im Berichtsjahre wurden in den Zentralen Technischen Einrichtungen (ZTE) des IPP die Vorarbeiten für die Erstellung der Helix, d. h. das Wickeln der Kupferleiter auf einen Modelltorus, angefangen und termingemäß beendet (Abb. 7). Da diese Komponente aber durch eine von der Lieferfirma zu vertretende Verzögerung des Torus mit Helix erst im Herbst 1975 geliefert wird, wurde beschlossen, im Sommer 1975 mit einem dünnen Vakuum-Gefäß ohne helikale Windungen (Abb. 8) Vorexperimente durchzuführen, die zur Erprobung und Optimierung der Plasmaproduktion, der verschiedenen Diagnostik-Methoden sowie des Hochfrequenzsystems dienen.

Unter Grenobler Verantwortung sind im Jahre 1974 die folgenden Arbeiten durchgeführt worden:

Die Stromversorgungen für die Hauptfeldspulen, für die Helix und für die Erregung des Transformators wurden im Labor installiert. Transistorverstärker für die Kontrolle der Plasmalage durch Rückkopplung wurden bestellt. Ein System zur Einkopplung mittlerer HF Leistung (100 kW/5 ms bei 500 mHz) stand Ende 1974 unmittelbar vor der Fertigstellung. Die Erhöhung auf 200 dann 400 kW wird vorbereitet. Die beiden Kleincomputer für Steuerung und Datenerfassung wurden geliefert und deren Programmierung begonnen, so daß die Systeme Sommer 1975 einsatzbereit sein werden. Außerdem wurde die dünne Schale hergestellt.

Die Diagnostikeinrichtungen wurden sowohl in Grenoble als auch in Garching vorbereitet.

(Abb. 7 und 8 auf der nächsten Seite!)



Links:
Abb. 7: Wickeln der Helix auf einen Modelltorus in den ZTE

Oben:
Abb. 8: Die dünne Schale WEGA - ein Vakuumgefäß für Vorexperimente ohne helikale Windungen

4. STELLARATOR W VII

(G. Wolf, H. Wobig¹⁾, M. Blaumoser, G. Duesing, J. Junker)

Die Entwicklung des W VII-Experiments war im Jahre 1974 bestimmt durch die Komplettierung, Anlieferung und Montage der wesentlichen Komponenten wie Hauptfeldspulen und Gerüst sowie einer Modifikation des W VII B-Torus, um die Kraftbelastung auf den Torus zu reduzieren. Organisatorisch ergab sich gegen Ende 1974 eine Änderung durch die Aufspaltung in die Projekte W VII A und W VII B, Neutralteilcheninjektion wird davon unabhängig als eigene Aktivität weitergeführt.

Das wissenschaftliche Programm des W VII wurde um die Multipolkonfiguration erweitert. Wegen der langen Erstellungszeit des W VII B-Torus steht für die Experimente am W VII A ein längerer Zeitraum zur Verfügung als ursprünglich vorgesehen. Neu ins Programm aufgenommen wurde auch die Vorionisierung durch Neutralteilcheninjektion. Verschiedene Firmenaufträge wurden im Jahr 1974 zum Abschluß gebracht: Hauptfeldspulen, Gerüst, Entwicklungsaufträge Torus mit Helix. Der Fortgang im Aufbau des Experiments wurde bestimmt durch erhebliche Überschreitung in den zugesagten Lieferzeiten (z. B. Hauptfeldspulen 6 Monate, Gerüst 4 Monate). Verzögerungen dieser Art zeigten die Notwendigkeit einer intensiven Firmenbetreuung durch Mitarbeiter des IPP (z. B. OH-Trafo).

Wegen der oben genannten Verzögerungen wurde, nachdem zum Jahresanfang das Fundament erstellt werden konnte, die Apparatur zu Testzwecken zunächst ohne Torus aufgebaut. Dieser Aufbau wurde im Dezember 1974 abgeschlossen. Die anschließenden Messungen und Tests entsprachen in etwa den Erwartungen, wenngleich einige technische Probleme in der Hauptsache an den Hauptfeldspulen auftraten, die zu erheblichen Zeitverzögerungen führten.

4.1 Gerüst

(P. Meyer)

Die Konstruktionsarbeiten am Gerüst gingen in den ersten Monaten des Jahres 1974 zu Ende. Das Fundament konnte gebaut und mit der Fertigung des oberen Tragrings begonnen werden. Das Stützrohr und der untere Tragrings wurden zusammenmontiert, Ende September geliefert und gemeinsam auf das Fundament gesetzt. Die Fertigstellung des oberen Tragrings erfolgte noch in den letzten Tagen des Jahres, die Lieferung dagegen erst im Januar 1975.

4.2 Hauptfeldspulen

(K. Freudenberger)

Im Berichtszeitraum wurden 42 der insgesamt 46 Hauptfeldspulen angeliefert und mit 1mm dicken Epoxyd-Glasfaserplatten an beiden Planflächen isoliert.

Da an den beiden Prototypspulen unter axialer Belastung größere Verformungen gemessen wurden als dies nach den Berechnungen zu erwarten war, wurden diese Messungen an den Serienspulen 3 und 4 wiederholt.

Bei der Herstellung der Serienspulen wurde besonders

auf eine gute Verklebung der beiden Pancakes miteinander geachtet, da das Fehlen dieser Verklebung der Grund für die geringere Festigkeit der Prototypspulen war. Tatsächlich ergaben die Messungen, daß die Verformung, bei gleicher Axialbelastung, bei den Serienspulen nur 1/3 so groß war wie bei den Prototypspulen.

Als nächstes wurden die Abstützelemente unter der sogenannten Katastrophenkraft erfolgreich getestet.

Gegen Jahresende war der Aufbau der 40 Spulen im W VII-Gerüst (unterer Tragrings und zentrales Stützrohr) abgeschlossen und die Spulen elektrisch untereinander verbunden. Anfang 1975 wird der Test des Spulenverbandes mit dem 1,45 GJ-Stoßgenerator durchgeführt. Die ersten vorläufigen Tests bis zu 40 kA verliefen erfolgreich. Es zeigte sich aber, daß die Flankenisolation den elektrischen Belastungen nicht standhielt; sie muß deshalb erneuert werden.

4.3 OH-Trafo- und Vertikalfeldspulen

(R. Jaenicke, R. C. Kunze, H. Lohnert)

Nachdem bereits 1973 die Spulen 1–3 des OH-Trafo und alle Vertikalfeldspulen (Spulen 5–7) in Auftrag gegeben worden waren, wurde im April 1974 auch der Auftrag für die Spule 4 erteilt.

Bei den Spulen 2 und 1, die nahezu identisch aufgebaut sind, traten jedoch bereits bei der ersten begonnenen Spule erhebliche technische Schwierigkeiten auf; sie bestanden darin, daß hier jede Windung aus 6 parallelen, voneinander isolierten Leitern (Querschnitt circa $20 \times 30 \text{ mm}^2$) besteht, die gemeinsam gewickelt werden müssen. Außerdem ist der Kupferfüllfaktor mit circa 92% sehr hoch; es traten deshalb zu Beginn der Arbeiten häufig Kurzschlüsse zwischen benachbarten Leitern auf. Durch Verbesserung des Herstellungsverfahrens konnten diese Schwierigkeiten gegen Ende des Jahres überwunden werden. Da die Herstellerfirma jedoch ihre Anstrengungen auf die Lösung dieser technischen Probleme konzentrierte, kam es auch bei allen anderen Spulen zu erheblichen Zeitverzögerungen. So traf die erste Spulenlieferung erst im Oktober 1974 im IPP ein. Die Auslieferung der letzten Spulen soll jetzt im Sommer 1975 erfolgen.

4.4 OH-Trafo-Schalter

(R. Jaenicke, R. C. Kunze, E. v. Mark, Gerh. Müller)

Das Ziel des bei einer amerikanischen Firma laufenden Entwicklungsauftrages über einen Hochstromschalter ist noch nicht erreicht worden. Es ist allerdings gelungen, die geforderten 10 kA gegen 30 kV abzuschalten, wenn die Stromführung von einem parallelen mechanischen Schalter übernommen wird. Zumindest nach diesem Prinzip sollte deshalb der Bau eines 35 kA/30 kV Abschalters möglich sein. Ein solcher Schalter wird jedoch nicht vor Ende 1975 einsatzbereit sein.

Mindestens für die Anfangsphase des W VII A wird deshalb der in Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig entwickelte Schalter mit Drahtexplosion benötigt²⁾. Gegen Jahresende 1974 wurden im IPP diesbezüglich Abschaltver-

¹⁾ Seit Dezember 1974 in der Projektleitung, ab März 1975 Projektleiter

²⁾ U. Braunsberger, J. Salge, U. Schwarz: Circuit Breaker for Power Amplification in Poloidal Field Circuits. Proceedings of the VIIIth Symposium on Fusion Technology, Noordwijkerhout, 1974, 399–406.

suche durchgeführt (Abb. 9), die den Nachweis erbrachten, daß Abschaltungen von 30 kA bei Spannungen bis 30 kV möglich sind.

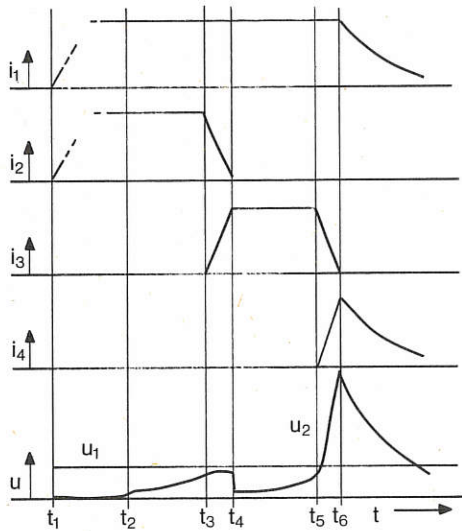
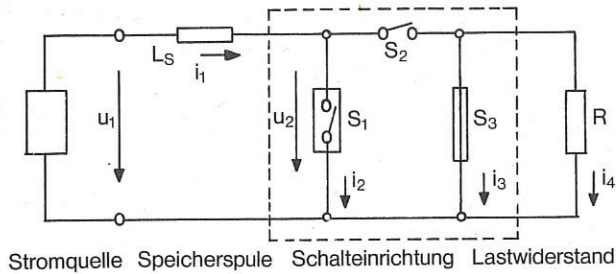


Abb. 9: Prinzipschaltbild zum Versuchsaufbau und die grundsätzlichen Strom- und Spannungsverläufe bei einer Abschaltung

Die im Jahresbericht 1973 dargestellten Arbeiten für ein ähnliches Schalterprinzip wurden 1974 fortgeführt und abgeschlossen. Es zeigte sich, daß diese Versuchseinrichtungen ohne wesentliche Veränderungen für die Abschaltung von Strömen > 10 kA bei Spannungen > 10 kV nicht geeignet ist.

4.5 Multipolspulen

(H. J. Jäckel, H. Wobig)

Im Gegensatz zum W VII B ist es im W VII A ohne Zusatzmaßnahmen nicht möglich, im Inneren des Torusgefäßes eine Separatrix der magnetischen Flächen zu erzeugen. Erst bei relativ hohen Werten der Rotationstransformation ($\#$) ($\# \approx 0.8$) wandert die Separatrix ins Innere des Torusgefäßes, dabei verformt sich aber die magnetische Fläche so stark, daß Plasmaexperimente unter diesen Umständen nicht sinnvoll erscheinen.

Es wurde deshalb vorgeschlagen, auf der Innenseite des Torus axialsymmetrische Multipolleiter anzubringen. Das von diesen Leitern erzeugte Poloidalfeld kompensiert das Poloidalfeld der helikalen Leiter, so daß innerhalb des Torusgefäßes ein Staupunkt – je nach Schaltung der Ströme auch zwei – entsteht. (Abb. 10). Rotationssymmetrische Rechnungen mit Hilfe des Lacknerschen Programms, unter Vernachlässigung des helikalen Feldes, ergaben für die Version mit einem Staupunkt („Fischform“) einen Plasmastrom bis zu 80 kA. Oberhalb dieses Wertes wandert der Staupunkt aus dem verfügbaren Volumen.

Das technische Konzept der Multipolwicklungen für den W VII A nützt den freien Raum außerhalb von Torus mit Helix und innerhalb der Apertur der Toroidalfeldspulen (Abb. 11). Die Multipolspulen sind für einen Strom von 40 kA ausgelegt und sollen in Reihe mit den Hauptfeldspulen und der Helix geschaltet werden. Die große Induktivität der Hauptfeldspulen verhindert, daß bei nicht stromkompensierten Multipolwicklungen starke Ströme durch den OH-Transformator in den Multipolspulen induziert werden.

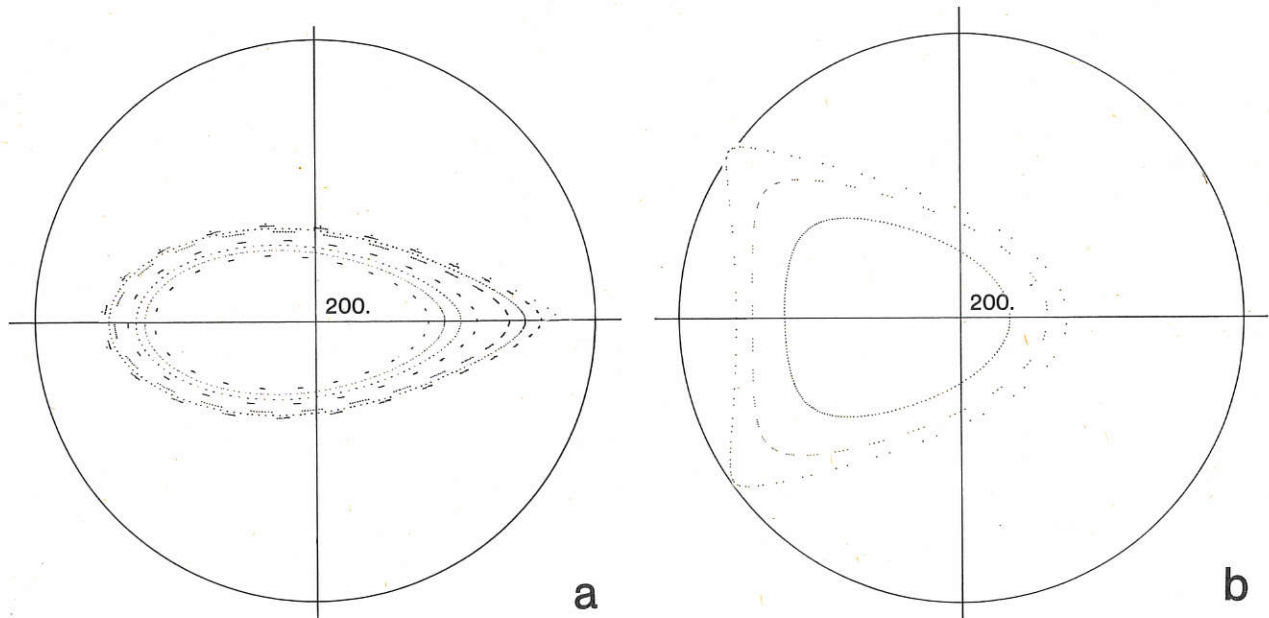


Abb. 10: Vakuumpfeld mit axialsymmetrischen Multipolleitern; a) 1 Staupunkt („Fischform“); b) 2 Staupunkte („ASDEX-Form“)

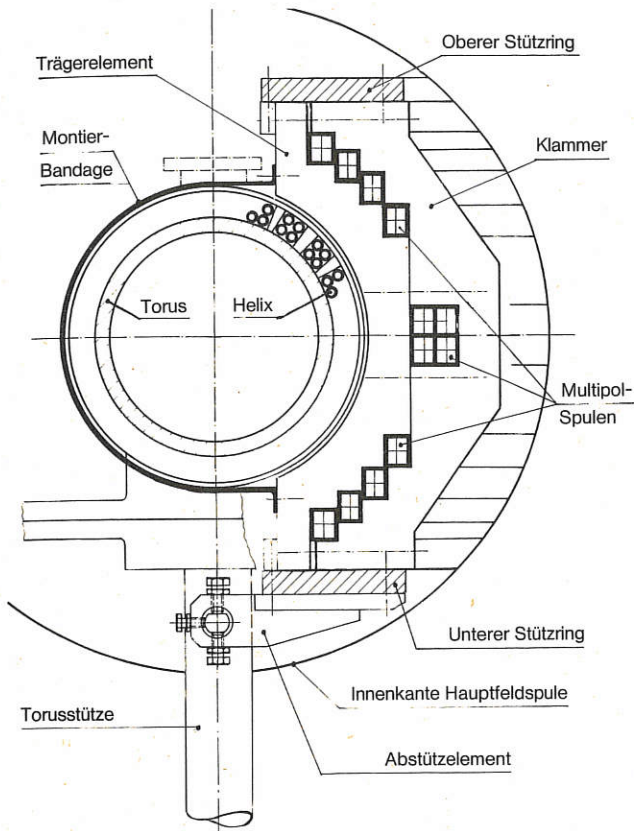


Abb. 11: Schnitt durch Torus mit Helix W VII A und Multipole

4.6 Kleines Vakuumgefäß W VII A

(H. J. Jäckel, J. Kiblinger, F. Rau, W. Poschenrieder)

Der Torus W VII A wurde im Januar 1974 geliefert. Nach dem Aufbringen der Unterbandagen und der Grundisolation konzentrierten sich die Tätigkeiten auf das Toruszwischenstück mit zugehöriger Aufspreizvorrichtung, die Konstruktionen zum Limitersystem, die Erstellung und den Test der Helix sowie die Konstruktion und teilweise Fertigung des Vakuumsystems.

4.6.1 Zwischenstück mit Aufspreizvorrichtung

Die Wechselwirkung von Helixstrom (bis 160 kA-Windungen) und Toroidalfeld (bis 4 T) bewirkt eine helikal umlau-

fende und in Zwischenstückmitte vertikal gerichtete Nettokraft bis zu 80 kp/cm, zusätzlich übt der Torus eine azimutale Federkraft aus. Die Beherrschung dieser Kräfte, bei der für die Experimente gestellten Anforderungen an Vakuum und Isolierung, stellt eine schwierige Aufgabe für Konstruktion und Fertigung des Zwischenstückes (ZTE) dar. Zum Berichtszeitpunkt sind Aufspreizvorrichtung und Zwischenstück fertiggestellt.

4.6.2 Limiter

Als Limiter für den W VII A wurde ein kombiniertes System gewählt:

- je 1 Schutzring im Zwischenstück nahe an den Torustrennflächen
- ein poloidal fast geschlossener Limiter in Zwischenstückmitte, bestehend aus 4 Viertelbögen, die um 1 cm in vertikaler Richtung verschiebbar sind.
- zwei oder drei langhubig verstellbare Limiterstäbe zur größeren Variation des Plasmaradius und zum Studium unterschiedlichen Limitermaterials.

Der Limiter in Zwischenstückmitte soll in zwei Versionen gebaut werden: a) massiver gebogener Mo Stab mit wassergekühlter Halterung (1–2 kW stationär), b) Luftkühlung bis in den Limiterstab hinein, circa 500 W stationär bei geringer Maximaltemperatur.

4.6.3 Helix

Die Helix für W VII A besteht aus jeweils 4 elektrisch parallel geschalteten Cu-Rohren, Gesamtwiderstand circa 3,5 m Ω , Induktivität (gemessen bei 50 Hz) circa 0,2 mH. Die Entwurfsdaten (40 kA, 3 s) wurden im Test hinsichtlich Strom (60 kA, 0,4 s) übertroffen (Helix-Eigenkräfte), hinsichtlich der Joule'schen Wärme (thermische Spannungen) nahezu erreicht (circa 20 kA, 12 s). Nur zwei Helixlötstellen zeigten schlechtere Übergangswiderstände; die Dehnungsbänder der Helixbrücken mußten nach dem Test erneuert werden (Technologiefehler bei erster Verarbeitung, sog. Wasserstoffkrankheit).

4.6.4 Magnetfeld-Konfiguration

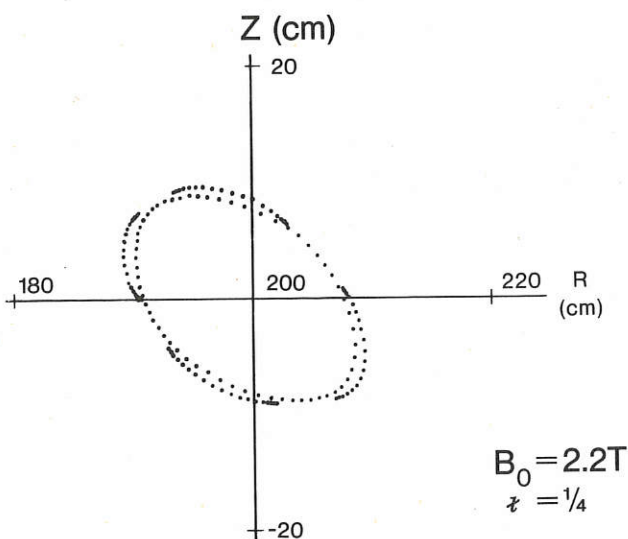
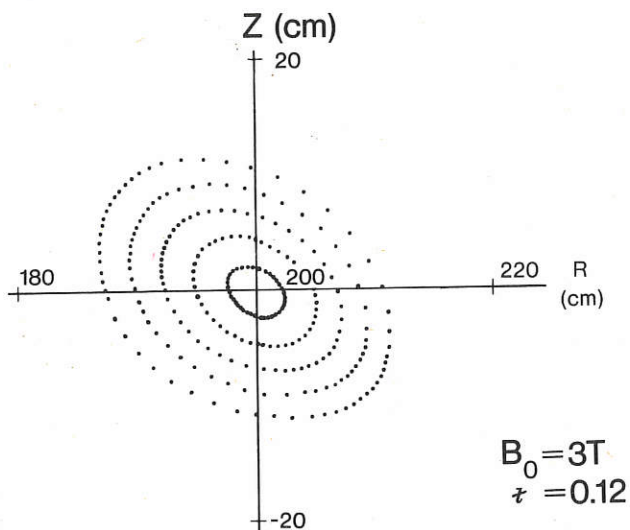
Bei Serienschaltung von Toroidalfeldspulen und Helix beträgt die Rotationstransformation $\epsilon = 0,21$, die Verscherung ist gering. Durch die Helixüberstiege werden bei rationalen ϵ Inseln in den magnetischen Flächen hervorgerufen.

Da die W VII A-Helix mit einem Mittelabgriff versehen ist, kann man auch $\ell = 2$ -Torsatron-Konfigurationen realisieren. Hierbei ist ein Vertikalfeld von ca. 0,06 T erforderlich. Im Vergleich zum Stellaratorfeld besitzen die Torsatron-Konfigurationen geringere Rotationstransformation, merkliche Verscherung und bei rationalem ϵ geringere radiale Ausdehnung der Inseln (vgl. Abb. 12).

(Abb. 12 auf der nächsten Seite)

Zu 4.6.4 Magnetfeld-Konfiguration

Abb. 12:
WVII A als Torsatron
 $I_H = 160 \text{ kA}$ in halber Helix
 $B_z = 0.06 \text{ T}$



4.6.5 Vakuumsystem W VII A

An drei der Stützebenen wird das in Abb. 13 skizzierte Vakuumsystem erstellt: je eine Turbomolekularpumpe (450 l/s) mit zweistufiger Vorpumpe (30 m³/h). Je 2 Volumengetterpumpen (ca. 2000 l/s für H₂) können zugeschaltet werden. Die Größe der Toroidal-feldspulen sowie die Sorge um Störung des Magnetfeldes durch die Eisenanker der Pumpmotoren bedingen verhältnismäßig lange Pumpleitungen.

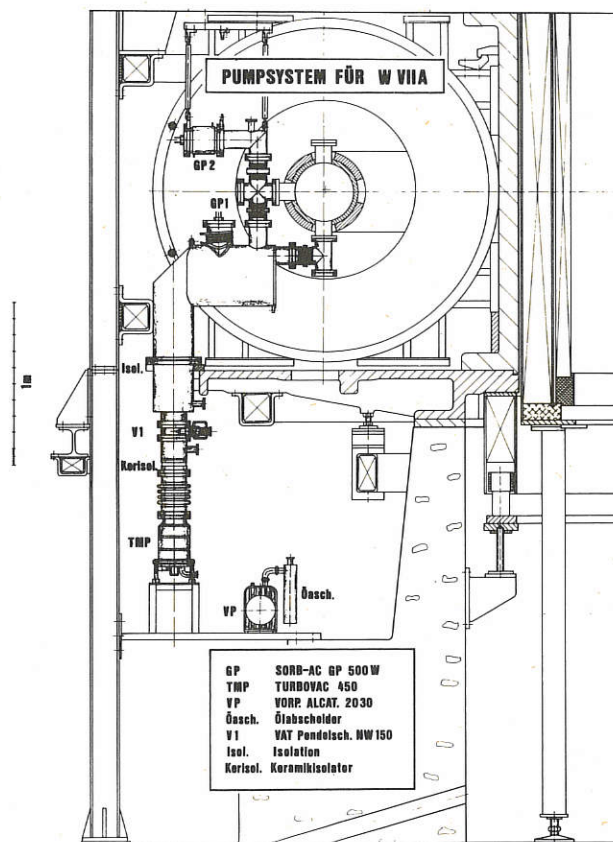


Abb. 13: Vakuumsystem W VII A

Die Saugleistung des Gesamtsystems beträgt circa 750 l/s für Luft und bei Betrieb der Getterpumpen circa 5000 l/s für H₂ und circa 1500 l/s für N₂, O₂ und CO. Das Überwachungssystem wird gestatten, wahlweise 1 bis 3 Pumpsysteme zu betreiben. Bei Lufteinbruch soll der Torus automatisch mit Argon geflutet werden, um das Abbrennen der Zr-Getterpatronen zu verhindern.

4.7 Großes Vakuumgefäß W VII B

(G. Duesing, K. Freudenberger, J. Kolos, R.-C. Kunze, B. Streibl, G. Wulff)

Die von zwei Firmen in Konkurrenz durchgeführten Entwicklungsaufträge zum Herstellungsverfahren von Torus mit Helix kamen in der ersten Jahreshälfte zum Abschluß. Sie erbrachten brauchbare Ergebnisse in vielen Einzelfragen der Festigkeitsberechnungen sowie der zu verwendenden Techniken und Materialien. Beide Aufträge ergaben jedoch kein sicheres Fertigungskonzept für das gesamte Bauteil. Die vorgeschlagenen Konstruktionen hätten die von elektro-

magnetischen Kräften herrührenden Belastungen nicht tragen können. Die physikalischen Parameter der Maschine wurden deshalb neu diskutiert. Dabei ergab sich, daß die mechanischen Belastungen durch folgende Maßnahmen beträchtlich reduziert werden können:

Reduktion der helikalen Ströme auf 720 kA in jedem der vier Leiterpakete,

geringfügige Reduktion der Torusapertur auf 66 cm Durchmesser,

Betrieb der Maschine derart, daß die maximale Rotationstransformation von 0,5 nur bei reduziertem Toroidfeld eingestellt wird.

Auf der Basis dieser Entwurfsparameter wurden verschiedene Verbundstrukturen aus Torus, helikalen Wicklungen und Bandagen auf Herstellbarkeit und ausreichende mechanische Festigkeit untersucht. Das Ergebnis ist nunmehr ein Fertigungskonzept, das auch an den kritischen Stellen des Bauteils (Zwischenstück, Tangentialkanäle, Befestigung der Stützstruktur auf dem Torus, thermische Belastung des Torus, lösbare Leiterverbindungen, Wasserschloßer) den Belastungen mit ausreichender Sicherheit standhält.

Die Fertigung der Torusstruktur wird an die Industrie vergeben. Die helikale Wicklung wird im IPP gefertigt und montiert, die hierzu erforderlichen und zum Teil recht aufwendigen Vorrichtungen jedoch extern hergestellt.

4.7.1 Abwicklung der Konzeptdefinition

Die Entwicklungsaufträge ergaben zu einem sehr späten Zeitpunkt, daß die Voraussetzung des zu untersuchenden Konzeptes – nämlich eine Verklebung der helikalen Wicklung mit Torus-Schwarten und Außenschale – großtechnisch nicht realisierbar ist und eine geschlossene Außenschale

Torusstruktur, Schematischer Aufbau

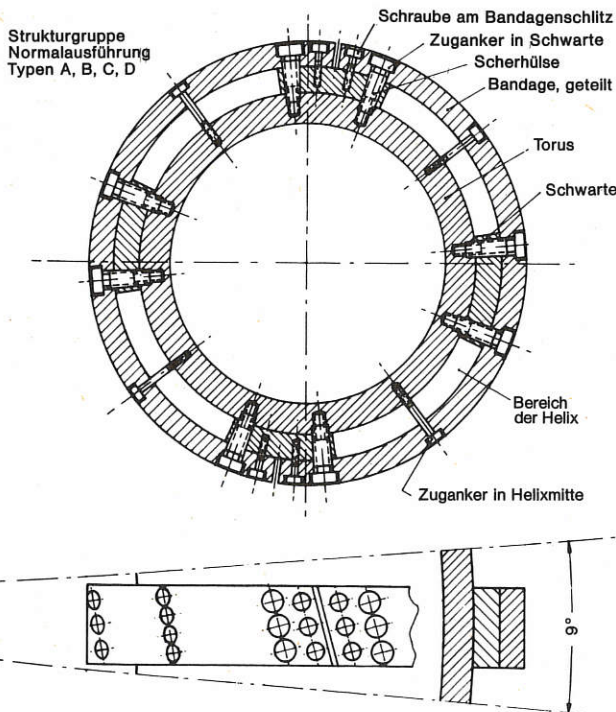


Abb. 15: Normale Strukturgruppe

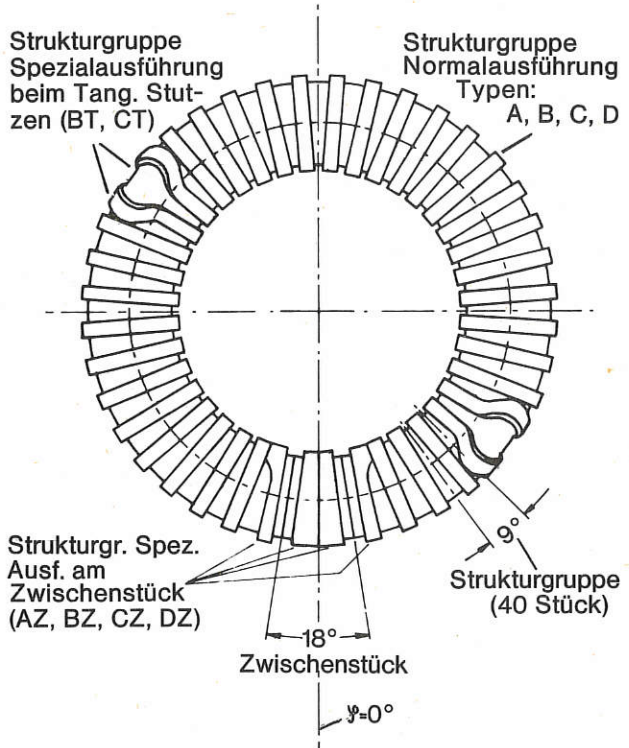


Abb. 14: Gesamte Stützstruktur

wegen der beträchtlichen Verletzungen durch die Kühlwasserzuführungen zur Helix keinen nutzbaren Festigkeitsgewinn bringt. Wie extern und am IPP durchgeführte Rechnungen zeigten, können dann die mechanischen Probleme am Zwischenstück und in den helikalen Leitern nur durch Erhöhung der Wandstärke von Torus und Bandagen, durch die Reduzierung der äußeren Kräfte auf 60% der ursprünglichen Kräfte und durch eine aufwendige Stützstruktur mit Schubübertragung im Schwartenbereich beherrscht werden.

Zur Erleichterung der Helixmontage sowie zur Ermöglichung späterer Reparaturarbeiten an Torus und Helix wurde diese Stützstruktur demontierbar konzipiert, d. h. die Schwarten sind auf den Torus aufgesetzt, die Bandagen werden hälftig geteilt und ebenfalls radial montiert; sie sind über Zuganker an den Schwartenrändern und in der Mitte eines Helixpaketes mit dem Torus verbunden.

Für die Schubübertragung an Schwartenober- und -unterseite wurde eine konzentrierte Schubeinleitung über 6 Scherhülsen an den Schwartenrändern gewählt (Abb. 15). Es ergaben sich rechnerisch ausreichende Sicherheitsfaktoren. Die zusätzliche Absicherung des Konzeptes durch Versuche ist eingeleitet. Die Anbringung der Strukturgruppen erforderte am Zwischenstück und an den Tangentialstützen Sonderkonstruktionen (Abb. 14).

Die geometrische Festlegung der Atom- und Clustereinschußstützen in Zusammenhang mit tangentialen Diagnostikkanälen konnte erst nach aufwendigen Untersuchungen mit dem erweiterten Computer-Zeichenprogramm ZARUPDA erfolgen. Die Untersuchungen ergaben ausreichende Möglichkeiten zur Auffächerung des Atomstrahls (Erhöhung der Einschubleistung) und zu tangentialer Diagnostik durch das Einschubloch selbst über einen Gabelstützen am Einschubkanal. Auf zusätzliche tangentiale Diagnostikstützen kann damit verzichtet werden.

Die thermische Belastung der Toruswand durch die Heizleistung aus Atomstrahl und Ohmscher Heizung bringt weitere mechanische Probleme mit sich. Schon eine Temperaturerhöhung des Torus gegenüber den Bandagen um 10°C führt aufgrund der Teilung der Bandagen zu einer Schubkraft von $2 \times 20\text{ t}$ je Schwarte. Eine eigene Wasserkühlung des Torus ist deshalb unumgänglich. Es wurden 4 Kühlkanäle unter jedem Helix-Leiterpaket vorgesehen. Während eines Pulses dringt der Wärmestrom sehr langsam in die Toruswand ein, so daß sich praktisch nur die innerste Schicht erwärmt, die in ihrer Ausdehnung durch die äußeren Schichten behindert wird. Die dabei auftretenden mechanischen Spannungen begrenzen die Pulsenergie auf etwa 10 MJ.

Weitere Probleme können sich durch ungleichmäßige Verteilung der thermischen Wandbelastung ergeben, die durch Atomeinschuß und verstärkte Plasmaverluste an den Separatrixstapunkten zu erwarten ist. Zur rechnerischen Erfassung des Problems wurde das Computerprogramm TOMHEBEL für toroidale Schalen unter thermischer und mechanischer Belastung entwickelt.

Eine weitere Belastung am Zwischenstück entsteht dadurch, daß die thermische Ausdehnung der Helix während des Pulses durch die steife Stützstruktur behindert wird. Analytische Rechnungen ergaben für die vorliegenden Kühlverhältnisse eine erforderliche Vorspannkraft von insgesamt 72 t.

4.7.2 Konstruktion und Fertigung der Torusstruktur

Den schematischen Aufbau der Torus-Struktur zeigte Abb. 14. Sie besteht aus dem außen glatten Torus mit dem Zwischenstück und aus 40 jeweils unter den Hauptfeldspulen auf dem Torus angebrachten Strukturgruppen. Eine typische Strukturgruppe zeigte Abb. 15. Der Helix-Periodizität entsprechend gibt es vier verschiedene Strukturgruppen, die sich zehnmal wiederholen. Nur diejenigen am Zwischenstück und bei den tangentialen Stützen haben abweichende Formen. Die radialen Stützen befinden sich zwischen den Strukturgruppen und sind über Metalldichtringe an den Torus geschraubt. Die tangentialen Stützen sind in den Torus eingeschweißt. Der Torus wird aus vorgearbeiteten Schmiedestücken zusammengeschweißt und nach Einpassen des Zwischenstücks mit diesem zusammen fertig bearbeitet. Die genau bearbeiteten Schwarten und Bandagen werden mit betriebsmäßiger Vorspannung auf den Torus montiert. Danach wird die gesamte Struktur demontiert und nach Aufbringen der helikalen Wicklung wieder zusammengebaut.

Für die Ausschreibung wird neben dem Zeichnungssatz ein detaillierter Fertigungsablaufplan erstellt, der alle Fertigungsverfahren, Arbeitsabläufe, Prüfvorgänge, Vorrichtungen und Vorschriften enthält, die zur Produktsicherung erforderlich sind. Zu dem gesamten Fertigungsablauf sind Termin- und Kostenanalysen erstellt worden.

4.7.3 Herstellungsverfahren der Helix

Die aus den Entwicklungsaufträgen hervorgegangenen Isolationskonzepte konnten nicht unverändert übernommen werden. Um die Aufbringung der Wicklung zu erleichtern,

wurde auf Einzelleiterisolation übergegangen. Die Wicklungsisolierung muß einer Spannung von 7,2 kV genügen. Bei der gewählten und inzwischen getesteten Ausführung sind die auftretenden Feldstärken an keiner Stelle der Isolierung größer als 5 kV/mm. Zwischen den isolierten Einzelleitern und der Torusstruktur werden noch zusätzlich 4 mm Isolierung in Form von mit Harz auflaminierten Glasfaser-matten aufgebracht.

Die Brücken über das Zwischenstück sind wassergekühlt und werden lösbar eingesetzt. Vorgesehen ist eine Kombination aus Schraub- und Weichlötverbindung. Ein Versuchsprogramm ist angelaufen, um eine einfache, zuverlässige Verbindung zu entwickeln.

Die Wicklung wird aus insgesamt 360 Einzelleiterstücken aufgebaut, von denen jedes über $\vartheta = 180^{\circ}$ reicht. Diese Stücke werden in der Äquatorialebene durch Stumpfhartlöten aneinandergereiht.

Für die Herstellung der Wicklung sind eine Vielzahl von Vorrichtungen erforderlich. Die wichtigsten sind:

- Der Manipulator, mit welchem das Torusgefäß zum Aufbringen der Wicklung dreh- und schwenkbar gelagert wird.
- Die Lötvorrichtung (Induktionslötanlage 10 kHz, 150 kW) mit einer entsprechenden Haltevorrichtung zur exakten Positionierung der Leiterenden während des Lötens.
- Die Bearbeitungsvorrichtung zur Halterung des gebogenen Einzelleiters beim Bearbeiten der Leiterenden und Einbringen der Bohrung für den Kühlwasseranschluß.
- Die Biegevorrichtung für die Kupferstangen der helikalen Leiter.

Für alle diese Vorrichtungen sind inzwischen die Entwurfszeichnungen fertiggestellt worden.

4.8 Neutralstrahlinjektion

(J. Bäumler, J. Junker, P. Melkus, W. Ott, G. Schilling¹⁾, E. Speth)

Neben der Heizung des Plasmas und der Nachlieferung von Teilchen und Energie zum Ausgleich der Verlustprozesse sollte der Einschub von energiereichen Neutralteilchen in ein kaltes Neutralgas zur Erzeugung und Vorionisierung des Plasmas führen. Ein solches Vorionisierungsexperiment wurde für die erste Ausbaustufe des W VII (W VII A) geplant und vorbereitet. Die Arbeiten zur Injektion für die zweite Ausbaustufe des W VII (W VII B) wurden fortgesetzt. Die Leistung des injizierten Neutralstrahls wurde auf 3 MW festgelegt, um auch bei anomalen Verlusten mit der Ohmschen Heizung konkurrieren zu können. Für die Bereitstellung der erforderlichen Teilchenquellen stehen wir in engem Kontakt mit den Entwicklungsgruppen für Ionenquellen in Fontenay-aux-Roses und in Culham.

4.8.1 W VII A-Neutralstrahlinjektion

Im Berichtsjahre wurde die experimentelle Arbeit auf die Vorbereitung eines Einschub-Experiments am W VII A konzentriert. Der Schwerpunkt des geplanten Experiments liegt in der Plasmaerzeugung durch Einschub von schnellen Neutralatomen in kaltes Neutralgas. Dies kann einerseits zur Vorionisierung für die Ohmsche Heizung dienen. (Am OR-

¹⁾ Jetzt Oak Ridge National Laboratory, Tenn., USA

MAK wurde diese Methode mit Erfolg angewandt.) Außerdem sollen in dem Experiment erste Untersuchungen zum Aufbau eines stromlosen Plasmas im Stellarator durchgeführt werden. Vorläufige Abschätzungen zeigen, daß man bei Einschub von 1–2 Ampere Neutralatomen mit Energien zwischen 30 und 40 keV Plasmadichten von 10^{11} – 10^{12} cm^{-3} in einigen 100 msec erreichen könnte.

Abb. 16 zeigt eine Gesamtansicht des Injektionssystems

mit den Hauptkomponenten Quelle, magnetische Abschirmung, Neutralisator, Vakuumsystem, Strahlumpf. Es wurde eine 8 cm ϕ -Quelle nach Vorlagen aus Culham gebaut, deren erste Tests erfolgreich verliefen: 3 A, 15 kV, 0.1 sec; Strom und Spannung sind vorläufig durch Hochspannungsgerät und Abschaltrohre begrenzt. Ferner wurde ein Strahlführungssystem konstruiert und in Fertigung gegeben. Die gesamte Anlage wird im Sommer 1975 fertig werden.

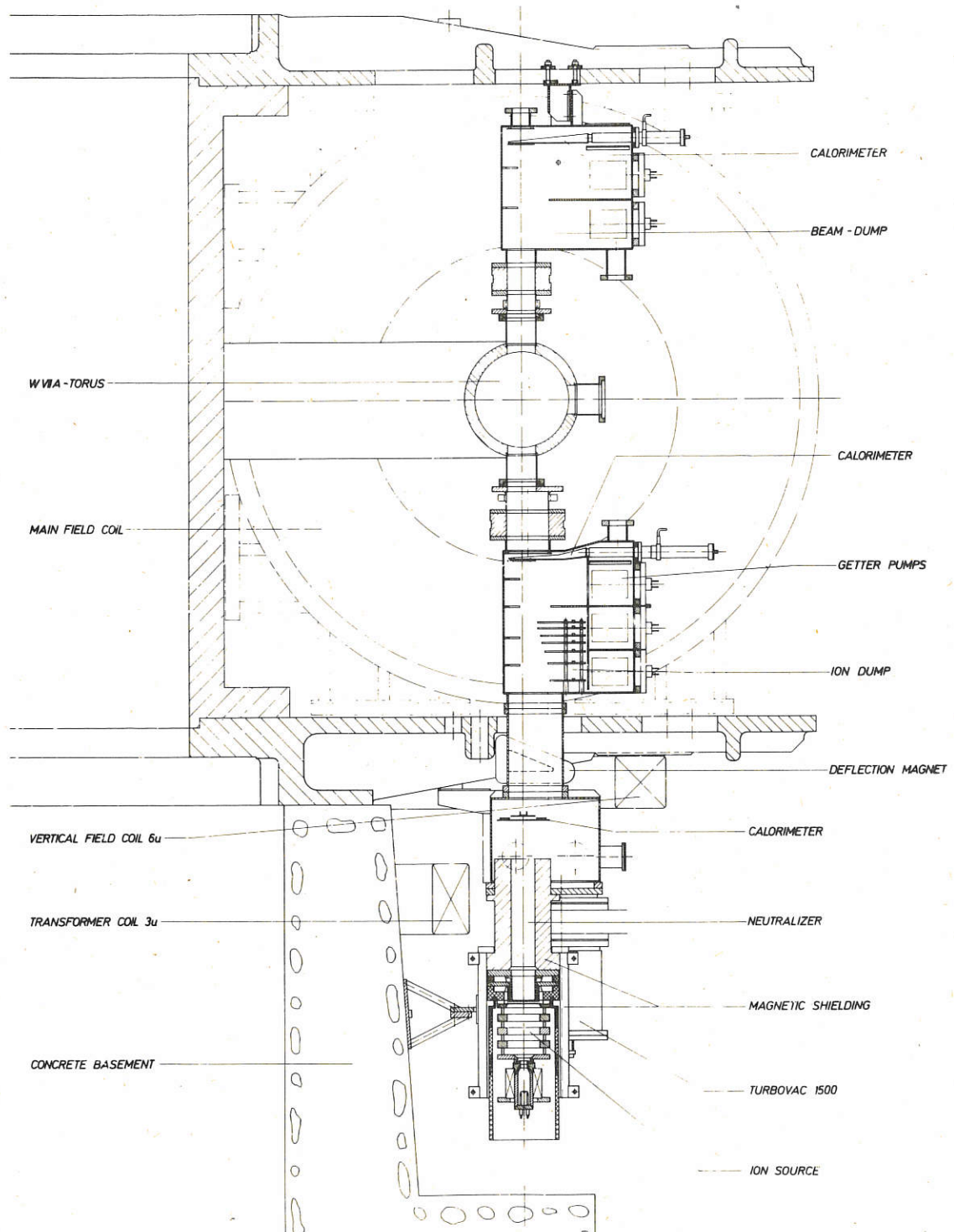


Abb. 16: W7-AS Vorionisierungsinjektor

4.8.2 W VII B-Neutralstrahlinjektion

Für den Einschub von Neutralteilchen wurden 4 Einschubkanäle und ein weiterer für den Clustereinschub nach Lage, Form und Richtung festgelegt. Die Achse des Tangentialstutzen ist um $+12.05^\circ$ (3 Stutzen) bzw. -12.05° (2 Stutzen) gegen die Horizontalebene geneigt. Der maximal erreichbare, durch den Abstand zwischen den Helixpaketen begrenzte Innendurchmesser beträgt etwa 15 cm.

Die maximale Ausnutzung des Einschubkanals führt auf eine rechteckige Teilchenquelle von circa 10×30 cm in etwa 2 m Abstand vom Torus mit einer fächerartigen Fokussierung auf den Tangentialstutzen. Der heutige Stand der Quellenentwicklung läßt erwarten, daß mit 4 solcher Teilchenquellen im W VII B bei 40 keV Teilchenenergie eine Neutralteilchenleistung von 3 MW (zumindest gepulst) erreicht werden kann.

4.8.3 Rechnungen

Zusammen mit dem Bereich Theorie des IPP wurde ein Programm zur Berechnung von Ratenkoeffizienten für die

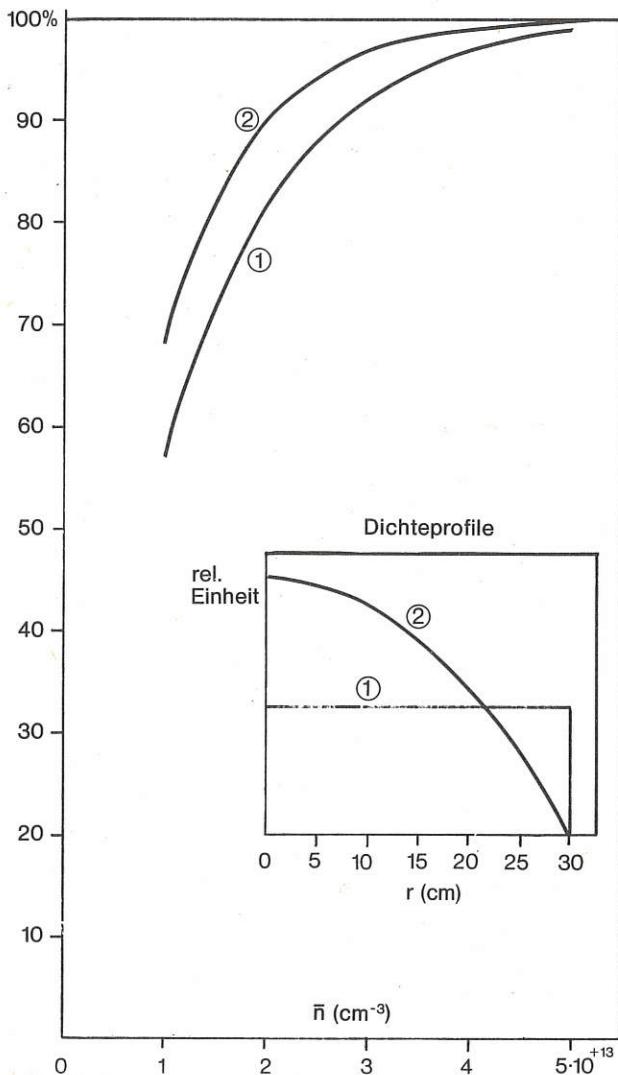


Abb. 17: Gesamtabsorption der Neutralteilchen in W VII B für verschiedene mittlere Dichten (\bar{n}); Einschubenergie: 40 keV
 1 Konstantes
 2 parabolisches
 Dichteprofil des Plasmas

atomaren Wechselwirkungsprozesse von monoenergetischen Teilchenstrahlen mit Maxwellischen Plasmen erstellt. Für den Fall von H^0 -Atomen in einem H^+ , e-Plasma wurden Ratenkoeffizienten und mittlere freie Weglängen für charge exchange, Proton- und Elektronenstoß-Ionisation im Energie- und Temperaturbereich 1eV–100 keV berechnet.

Wichtig für die Festlegung der optimalen Teilchenenergie ist die Absorption der Neutralteilchen im Plasma. Für die spezielle Einschubgeometrie des W VII B wurden hierzu Rechnungen durchgeführt. Eingeschossen werden Wasserstoffatome mit 40 keV Energie in ein Wasserstoffplasma von 30 cm Radius. Der insgesamt im Plasma absorbierte Anteil der eingeschossenen Neutralteilchen ist in Abb. 17 dargestellt. Bei einem parabolischen Dichteprofil ist die Absorption größer als bei einer konstanten Dichte. In weitergehenden Rechnungen wird die radiale Verteilung der schnellen Ionen untersucht. Erste Ergebnisse zeigen, daß die Ionisation der Neutralteilchen überwiegend im Radiusbereich von 10 bis 20 cm geschieht.

Für ein Heizungsexperiment am W VII A durch quasiradialen Einschub (82°) wurden Abschätzungen gemacht, nach welchen bei einer Injektion von 4×30 A und 10–20 kV bis zu 150 kW an die Plasma-Ionen übertragen werden.

4.8.4 Hochspannungs-Schnellabschaltung

Zum Schutz der Beschleunigungsgitter in der Ionenquelle wurde eine Hochspannungs-Schnellabschaltung entwickelt. Mittels einer Hochspannungstetrode, welche als Schalter in Serie mit dem Verbraucher liegt, läßt sich im Falle eines Hochspannungsdurchschlags die Hochspannung so schnell vom Verbraucher abschalten, daß in dem Kurzschluß nur noch eine Energie von der Größenordnung 1 Joule in Wärme umgesetzt werden kann. Das Schema der Hochspannungsversorgung und der Abschaltung ist in Abb. 18 (auf Seite 33) wiedergegeben. Die 20 kV, 4 A-Anlage ist seit Mitte 1974 in Betrieb und hat in etwa 500 Betriebsstunden verhindert, daß an den Beschleunigungsgittern Schädigungen auftraten. Die nächste Ausbaustufe für 45 kV und 10 A wurde entwickelt und wird am Vorionisierungsinjektor für den W VII A eingesetzt werden.

4.8.5 Bestrahlungsexperimente

Der Teststand wurde ab Sommer 1974 zu $\approx 50\%$ dem Projekt PWW für Bestrahlungsexperimente zur Verfügung gestellt. Gegen Ende des Jahres wurde für PWW ein eigener Hochstromstand errichtet, da der Teststand für die Vorbereitung des W VII A-Vorionisierungsexperimentes benötigt wurde. Außerdem wurden für die GfK Karlsruhe supraleitende HF-Resonatoren mit 18 keV He bestrahlt. Man erwartet hierdurch höhere Korrosionsbeständigkeit und Hochspannungsfestigkeit der Resonatoren.

4.9 Diagnostik

(H. Ringler, H. Hacker, E. Speth, E. Würsching)

Für die Diagnostik am W VII A sollen im wesentlichen Methoden angewandt werden, die bereits am W II B und am PULSATOR (Röntgendiagnostik) entwickelt und eingesetzt wurden. Dazu war es nötig, die bereits vorhandenen Anordnungen zu modifizieren oder zu erweitern.

Für die Messung des zeitlichen Verlaufs der Elektronendichte ist für die erste Experimentierphase am W VII A ein

Zu 4.8.4 Hochspannungs-Schnellabschaltung

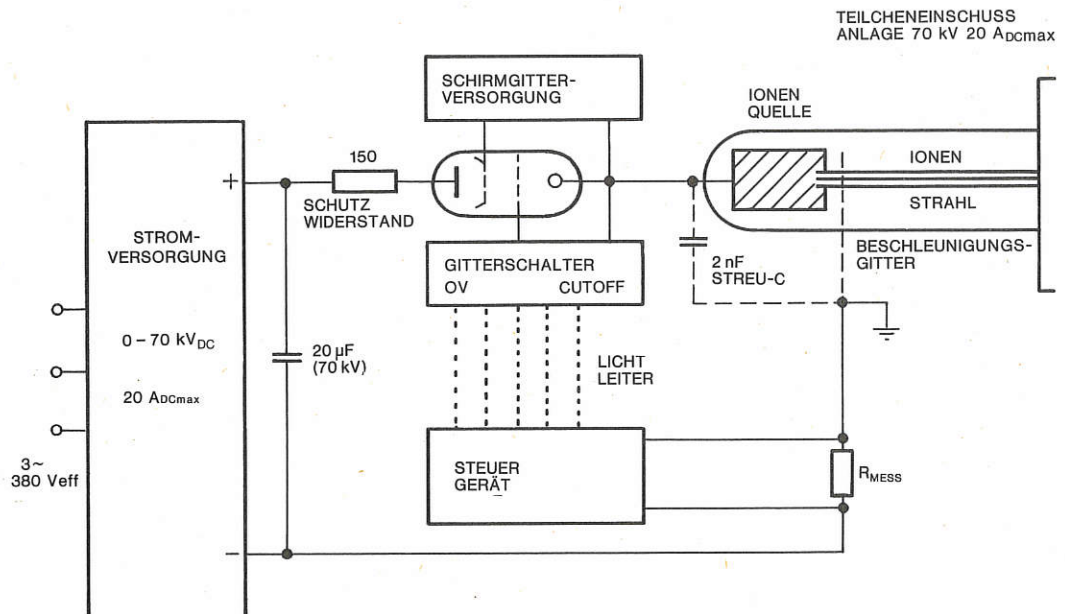


Abb. 18: Hochspannungsschnellabschaltung

1-Kanal-Mikrowelleninterferometer nahezu fertiggestellt. Es arbeitet nach dem Transmissionsprinzip und gestattet die Messung auch von relativ niedrigen Elektronendichten, wie sie bei den zu untersuchenden Vorionisierungsplasmen auftreten. Es kann sowohl im 8 mm- als auch im 4 mm- oder 2 mm-Wellenlängenbereich betrieben werden (entsprechend cut-off-Dichten: 1,5, 6,07, 29,4 x 10¹³ cm⁻³). Mit diesem System sollen auch Erfahrungen über die Auswirkung von-Vibrationen auf die Messung und über das thermische bzw. vakuummäßige Verhalten der einzubauenden Teile gesammelt werden.

Als endgültige Version ist ein 5-Kanal-Interferometer für den 2mm-Wellenlängenbereich vorgesehen. Die Fertigung ist angelaufen.

Für die lokale Messung von Elektronendichte und Temperatur mit Hilfe der Thomsonstreuung von Laserlicht wurde ein System konzipiert, das auch am WEGA-Stellarator eingesetzt werden kann. Der Laser (Korad K 1500) wird dabei vertikal von unten nach oben in das Plasma abgebildet. Das gestreute Licht kann unter 90° durch ein Horizontalfenster betrachtet werden. Die geringe lichte Weite dieses Fensters von circa 99 mm erlaubt nicht den ganzen Plasmaquerschnitt (30 cm) bei einer Entladung mit der erforderlichen Öffnung abzubilden. Es wird daher von einer Industriefirma eine Optik gebaut, die es erlaubt, mit Hilfe von Drehkeilen jeden Punkt des Plasmadurchmessers mit einer Öffnung von 1:3,7 zu beobachten. Die spektrale Zerlegung des gestreuten Lichtes soll mit einem 7-Kanal Filterpolychromator erfolgen.

Zur Messung der Ionentemperatur ist neben der Bestimmung von Dopplertemperaturen aus Ionen der Verunreinigungslinien ein 5 Kanal-Neutralteilchenanalysator (VNESH-

TECHNIKA/UdSSR) vorgesehen, der Mitte 75 verfügbar sein soll.

Um die Vakuumspektroskopie auf das für das W VII A Plasma interessante Wellenlängengebiet zwischen 20 bis 500 Å auszudehnen, wurde ein Grazing Incidence Spektrograph (Gismo) bestellt, der ebenfalls Mitte 1975 ausgeliefert werden wird.

4.10 Steuerung und Überwachung

(M. Zippe)

Die Steuer- und Überwachungseinrichtungen sind in der Regel Bestandteil der jeweiligen Untersysteme, wobei Bedienung, Summenüberwachung und sicherheitstechnische Verknüpfung zusammen mit den Kommunikationsmitteln in einer Betriebszentrale zusammengefaßt sind. Im Berichtszeitraum wurden fertiggestellt:

Erste Ausbaustufe des Timers (48 Kanäle in 3 Zeitrastern) mit einem Terminal und allen Ausgabeeinrichtungen, Zentralüberwachungseinschub, Summenüberwachungen für Teilcheneinschuß und Temperatur, Temperaturüberwachung der Hauptfeldspulen, Türüberwachung, Spannungsüberwachung der Helixbrücken und Hauptfeldspulen sowie Hilfseinrichtungen zur Überwachung der mechanischen Struktur.

Am Steuer- und Überwachungssystem der Vakuumanlage, an der Temperaturüberwachung für Helixbrücken und OH-Trafo, DMS-Anlage und einigen Zentraleinrichtungen (Echtzeit-Registrierung, Schußnummern-Zählung, Rechnerinterface) wird gearbeitet, ebenso an der Fernbedienung der Energieversorgung OH-Trafo. Bisher verläuft die Fertigung der Überwachungseinrichtungen terminlich abgestimmt mit der Fertigung der jeweiligen Komponenten.

4.11 Energieversorgung

(M. Blaumoser, K. Freudenberger, H. Rixner)

Der Aufbau des 1,45 GJ-Generators einschließlich Leitung nach L 7 A wurde weitgehend abgeschlossen, so daß der Generator Anfang 1975 zum Test des W VII-Hauptfeldsystems eingesetzt werden kann. Für den Anschluß der Hauptfeldspulen in L 7 wurde für den Test eine provisorische Leitung verlegt.

Der Umbau der 60 kA-L 5 E-Gleichrichteranlage auf 30 kA-Antiparallelbetrieb wurde geplant und ist in Angriff genommen. Abschluß der Arbeiten voraussichtlich Jahresmitte 1975. Die 60 kA-Hochstromleitung von L 5 E über L 1 nach L 7 A wurde gebaut und erfolgreich getestet. Somit steht die Energie der für W VII erforderlichen Stromversorgungseinrichtungen in L 7 bzw. L 7 A zur Verfügung.

4.12 Kühlung

(A. Elsner)

Die Montagearbeiten zur Kühlwasserversorgung für W VII sollen im Februar 1975 abgeschlossen werden. Bei der Abnahme der Anlage werden die Pumpen und das Rohrleitungssystem, jedoch noch nicht die Wärmetauscher getestet. Dem Test der Kühlkreisläufe für Helix und Sonderspulen galt besonderes Interesse, weil in diesen Kreisen das Wasser aus unter Druck stehenden Behältern innerhalb etwa einer halben Minute durch die zu kühlenden Systeme gedrückt wird. Dabei wird während 10 Sekunden ein Wasserdurchsatz von bis zu 1500 m³/h erreicht. Der damit verbundene Druckstoß in der Rohrleitung und die Geräuschentwicklung am Experimentierort sind tolerabel.

4.13 Datenerfassung am W VII

(S. Rehker, J. Saffert)

Die Datenerfassungsanlage PDP-11 wurde im Jahre 1974 durch eine Wechselplatteneinheit RK 05 mit großer Kapazität erweitert. Dadurch ist ein Kopieren der aufgenommenen Daten auf Magnetband während des Experimentierbetriebes überflüssig geworden. Die Anzahl der zeitabhängigen Meßkanäle wurde von 5 auf 7 erhöht und die Auswerteprogramme durch die Möglichkeit erweitert, beliebige

aus Meßwerten berechnete Größen miteinander zu korrelieren. Damit können theoretisch vorhergesagte Zusammenhänge nachgeprüft und sichtbar gemacht werden.

Gegen Ende des Jahres wurde das provisorische System „RESI“ vom System „DASSYS“ abgelöst. Das am W II B im Einsatz befindliche Software-System kann am W VII mit nur geringfügigen Änderungen übernommen werden, wenn die Hardware auf ein CAMAC-System umgestellt wird.

4.14 Theorie

(S. Rehker, H. Wobig)

Die Magnetfeldrechnungen über den Einfluß von Störungen auf die Struktur magnetischer Flächen wurden im Jahre 1974 fortgesetzt. Der Einfluß eines OH-Trafos mit Eisenkern wurde dabei durch ein periodisch wechselndes Vertikalfeld simuliert. Es zeigt sich, daß im Stellaratorfeld in Abhängigkeit von der Periodizität bei rationalen Werten von ι starke Inseln auftreten. In einem Magnetfeld mit Ohmschem Heizstrom ist das Gesamtfeld nicht mehr selbstkonsistent beschreibbar. Das Magnetfeld des OH-Stromes wurde daher durch ein achsialsymmetrisches Feld angenähert. Die resonante Störung durch äußere Felder trat dann auf, wenn die Summe der externen und der durch den OH-Strom erzeugten Rotationstransformation eine rationale Zahl ist.

Der Einfluß von Magnetfeldstörungen auf die Umgebung der Separatrix wurde am Beispiel des ASDEX- und des TEXTOR-Feldes untersucht. Durch die Erweiterung des Gourdon'schen Programmes auf eine Racetrackkonfiguration mit WR-Spulen, konnte die Existenz von magnetischen Flächen auch bei einer solchen Anordnung gezeigt werden. Weitere Magnetfeldrechnungen wurden durchgeführt, um die Multipolkonfiguration, die als eine Erweiterung des W VII-Programms vorgesehen ist, zu untersuchen. Es zeigte sich, daß eine Separatrix des Magnetfeldes innerhalb des Vakuumgefäßes erzeugt werden kann. Das Plasmagleichgewicht ohne helikale Felder wurde mit Hilfe des Lacknerschen Programms berechnet.

Um die Berechnungen der Teilchenbahnen in der Nähe der Hauptfeldspulen des W VII zu ermöglichen, wurde das Gourdonprogramm durch eine Unterroutine von R. Pöhlchen erweitert.

Bereich Tokamak

(Dr. Gerhart von Gierke)

Das seit 1973 laufende PULSATOR-Experiment konnte im Jahre 1974 ohne technische Schwierigkeiten erfolgreich betrieben werden.

Im Vordergrund stand die Untersuchung der Abbruchinstabilität („disruptive instability“), deren Verständnis allgemein für den Betrieb von Tokamaks mit höheren Strömen und im besonderen wegen der bei dieser Instabilität freiwerdenden Energie, die zu Beschädigungen des Vakuumgefäßes führen kann, von großem Interesse ist.

Neben der Untersuchung der spontanen Abbruchinstabilität, die Beobachtungen an anderen Tokamaks bestätigte und neue Erkenntnisse brachte, konnte durch Einsatz der nur am PULSATOR zur Verfügung stehenden schnellen Vertikal-feld- und helischen Windungen ($\ell = 2, n = 1$) eine in allen Einzelheiten der Abbruchinstabilität gleiche Instabilität induziert werden. Hierdurch konnten die Vorbedingungen für den Einsatz der Instabilität geklärt werden.

Besonders interessant sind die Ergebnisse mit helischen Feldstörungen. Die Hypothese, nach der durch geometrische Resonanz Inseln am Ort der magnetischen Fläche $q = 2$ erzeugt werden, deren Breite proportional zu $\sqrt{I_{hel}/B_\phi}$ ist (I_{hel} = Strom in den helischen Windungen, B_ϕ = Stärke des Hauptfeldes), erklärt die bisher gefundenen Phänomene weitgehend und dient als Leitlinie für die Fortsetzung der Experimente. Bei helischen Strömen dicht unterhalb der für das Induzieren der Abbruchinstabilität notwendigen Stromstärken werden die sonst beobachteten MHD-Moden gedämpft und eine ohne helisches Feld auftretende spontane Instabilität kann vermieden werden. Es muß noch geklärt werden, worauf diese Verbesserung des Stabilitätsverhaltens beruht.

Der zweite Schwerpunkt der Untersuchungen am PULSATOR betraf das zeitliche und räumliche Verhalten der Plasmazusammensetzung. Die Standardmeßmethoden, insbesondere die Röntgenstrahl-Meßmethoden, konnten weiterentwickelt werden. Trotz des Vorliegens sehr vieler Einzelbeobachtungen muß noch beträchtliche Experimentierarbeit geleistet werden, bevor eine kohärente Beschreibung der verschiedenen Entladungstypen und im besonderen des Verhaltens der Verunreinigungen gegeben werden kann.

Nachdem im Oktober 1973 der erste Vorschlag für das ASDEX-Experiment (Axially Symmetric Divertor Experiment) vorlag, konnte im Juni 1974 ein vollständiger Vorschlag bei der Groupe de Liaison eingereicht werden. Im September 1974 wurde das Experiment als prioritäres Experiment von EURATOM anerkannt.

In der Zwischenzeit wurde das ASDEX-Team – soweit es das wissenschaftli-

che Personal betrifft – in etwa auf die notwendige Stärke gebracht. In der weiteren Ausarbeitung des Vorschlages mußten bis jetzt nur geringfügige Änderungen am technischen Konzept vorgenommen werden. Die größte und teuerste Einzelkomponente – die Hauptfeldspulen – wurde termingerecht im Herbst 1974 ausgeschrieben und im Dezember 1974 vergeben. Damit liegt ASDEX im Zeitplan.

1. PULSATOR

(O. Klüber¹⁾, M. Brusati²⁾, B. Cannici³⁾, S. Corti⁴⁾, W. Engelhardt²⁾, J. Gernhardt, E. Glock, H. Hohenöcker, F. Karger, G. Lisitano³⁾, K. McCormick⁴⁾, D. Meisel, P. Morandi³⁾, S. Sesnic, H. Wobig⁴⁾, H. P. Zehrfeld)

Die im Jahre 1974 am Experiment PULSATOR durchgeführten Untersuchungen befaßten sich mit zwei Themen, die für die Weiterentwicklung des TOKAMAK zum Fusionsreaktor von zentraler Bedeutung sind, nämlich mit der Abbruchinstabilität und mit der Zusammensetzung des Plasmas, d. h. insbesondere der Rolle der Verunreinigungen und der runaway-Elektronen. Daneben wurden die Entwicklungsarbeiten auf den Gebieten der Diagnostik, der Datenverarbeitung und der HF-Vorionisierung fortgesetzt. Schließlich wurde unter Mitarbeit von Kollegen aus dem ASDEX-Team und aus dem Bereich Theorie ein Konzept für das PML-Experiment entwickelt. Mit PML, einer umgebauten Version von PULSATOR, sollen die ASDEX-typischen, d. h. durch die Multipol-Konfiguration gegebenen Stabilitätsfragen untersucht und die an PULSATOR begonnenen Experimente mit helischen Windungen erweitert und fortgesetzt werden.

1.1 Resultate am PULSATOR

1.1.1 Abbruchinstabilität

Über das „spontane“ Auftreten der Abbruchinstabilität lassen sich aufgrund unserer Ergebnisse folgende Aussagen machen:

- Die Instabilität setzt vorzugsweise bei ganzzahligen q (a) ein.
- Für ganzzahlige q (a) tritt die MHD-Mode mit der Modenzahl $m = q$ (a) mit maximaler Amplitude auf.
- Die MHD-Moden führen zu Rauschen in der Ringspannung, Modulation der Streifenverschiebung in den Kanälen des Mikrowellen-Interferometers und zu Modulation der Linien- und Kontinuumsemission im Sichtbaren.
- Die Abbruchinstabilität konnte für ganzzahlige q (a) ≥ 3 durch Zentrieren der Plasmasäule (programmiertes Vertikalfeld) vermieden werden. Es war zwar nicht möglich, q (a) = 2 zu erreichen, jedoch ließ sich durch sehr sorgfältige Zentrierung der Minimalwert q (a) = 2,3 für verschiedene Parameter stabil reproduzieren. Abb. 1 zeigt als Beispiel eine Entladung mit $q_{\min} = 2,3$ bei maximalem Hauptmagnetfeld und somit auch maximalem Plas-

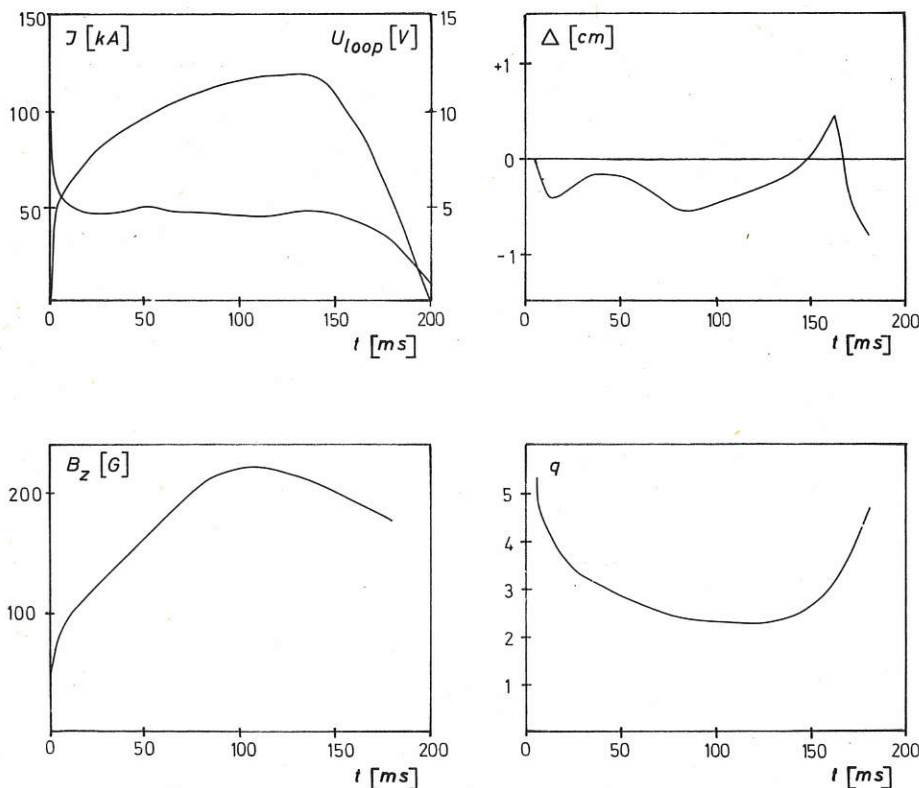


Abb. 1:
Plasmastrom I ,
Ringspannung U_{loop}
Vertikalfeld B_z ,
Plasmaverschiebung Δ
und Stabilitätsfaktor q
für eine Entladung
mit $q_{\min} = 2,3$
bei einem Hauptmagnetfeld
von 28 kG.

¹⁾ Gastforscher ²⁾ Bereich Hoch-Beta-Plasmen ³⁾ EURATOM ⁴⁾ Bereich Niedrig-Beta-Stellaratoren.

mastrom. Insgesamt nimmt die Verschiebung, die man noch zulassen kann, ohne daß das Plasma instabil wird, mit abnehmendem q (a) ab.

- Ob die Instabilität zu völligem Stromabbruch führt oder ob der Strom wieder ansteigt, hängt davon ab, ob die Plasmasäule vor Einsetzen der Instabilität nach innen oder nach außen verschoben war. Dieser Unterschied zwischen „harter“ und „sanfter“ Instabilität kann halbphänomenologisch erklärt werden / 127 /.

Nach diesen Ergebnissen sind zwei Voraussetzungen für das spontane Einsetzen der „disruptive instability“ maßgebend:

- das Auftreten von MHD-Moden hinreichend großer Amplitude in den Randzonen des Plasmas,
- zu starke Verschiebung der Plasmasäule.

Ein Zusammenhang zwischen beiden Voraussetzungen kann darin gesehen werden, daß die mit den MHD-Moden verknüpften Feldstörungen auf den rationalen magnetischen Flächen Inseln erzeugen, wie zuerst von *Chrisman et al.*¹⁾ gezeigt wurde. Man kann vermuten, daß ein Kontakt dieser Inseln mit dem Limiter die Instabilität auslöst. Diese Interpretation wird stark gestützt durch die Experimente, bei denen die „disruptive instability“ durch Eingriffe von außen „getriggert“ wurde. Diese Experimente wurden ermöglicht durch zwei Besonderheiten der Pulsator-Anlage, nämlich:

- die Möglichkeit, das Vertikalfeld rasch zu ändern,
- den Einsatz der helischen Windungen mit $\ell = 2, n = 1$.

Im PULSATOR läßt sich der Strom in den innerhalb der Kupferschale gelegenen Vertikalfeldwindungen pulsartig für z. B. 10 ms erhöhen oder herabsetzen. Dabei zeigte sich folgendes:

- Für beliebig wählbare Zeitpunkte, d. h. für beliebige q (a) läßt sich — bei hinreichender Verschiebung — die „disruptive instability“ auslösen.
- Ebenso wie bei der „spontanen“ Instabilität entscheidet Verschiebung nach innen oder außen über völligen Abbruch oder Wiederanstieg des Stromes. In Abb. 2 (auf Seite 38) ist der Verlauf eines Experiments dargestellt, bei dem ein zentriertes, stabiles Plasma durch Verschiebung nach innen und nach außen zum Abbruch gebracht wird.

Die helischen Windungen erzeugen durch geometrische Resonanz Inseln am Ort der magnetischen Fläche $q = 2$, wenn die Helizitäten des TOKAMAK-Magnetfeldes und des helischen Zusatzfeldes gleichsinnig sind. Die Inselbreite ist dabei proportional zu $\sqrt{I_{hel}/B_\phi}$ wo I_{hel} der Strom in den helischen Windungen und B_ϕ das toroidale Magnetfeld ist. Die Experimente mit resonanten helischen Feldern ergaben: / 115 /

- Bei sonst festgehaltenen Entladungsbedingungen läßt sich ein kritischer helischer Strom I_{hel}^+ angeben, dessen Überschreitung die „disruptive instability“ auslöst. Dieser kritische Strom ist so klein, daß die Änderung der Gesamttrotationstransformation typisch bei 10^{-4} oder darunter liegt. Im nichtresonanten Fall (gegenseinnige Helizitäten) haben auch um über eine Größenordnung stärkere helische Ströme keinen Einfluß auf die Stabilität.

- Dicht unterhalb des kritischen Wertes I_{hel}^+ werden die Amplituden der niedrigen MHD-Moden — vor allem $m =$

2 — stark gedämpft. Das trifft sowohl für zeitlich anwachsenden helischen Strom zu als auch für den Fall, daß helischer Strom und Plasmastrom zeitlich konstant sind. Abb. 3 zeigt den Fall zeitlich anwachsenden helischen Stromes: Dämpfung des Modensignals für $I_{hel} < I_{hel}^+$ Abbruch bei Erreichen von I_{hel}^+ .

- Bleibt man knapp unterhalb des kritischen helischen Stromes, so wird das Stabilitätsverhalten verbessert, d. h. mit den helischen Windungen kann dann eine sonst auftretende Abbruchinstabilität verhindert werden, wie in Abb. 4 gezeigt wird.

- Wird der kritische helische Strom I_{hel}^+ nur kurzzeitig, d. h. für weniger als 1 ms überschritten, so tritt keine Abbruchinstabilität auf. Für längere Überschreitung von I_{hel}^+ ist der Abbruch gegenüber dem Einsetzen des erhöhten Störfeldes um mindestens 1 ms verzögert. Aus diesen Ergebnissen läßt sich folgern, daß der Aufbau der Inseln ein resistiver Prozeß ist. Das zeigen auch Experi-

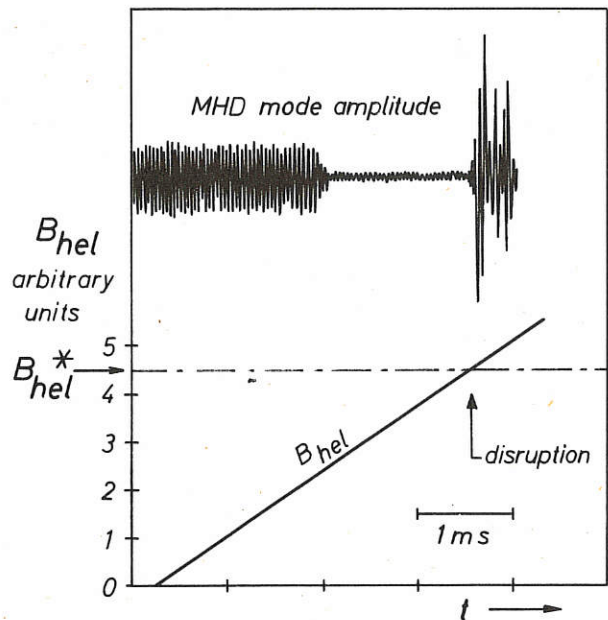


Abb. 3: Modendämpfung und Auslösung der Abbruchinstabilität für zeitlich anwachsendes helisches Feld bei konstantem Plasmastrom.

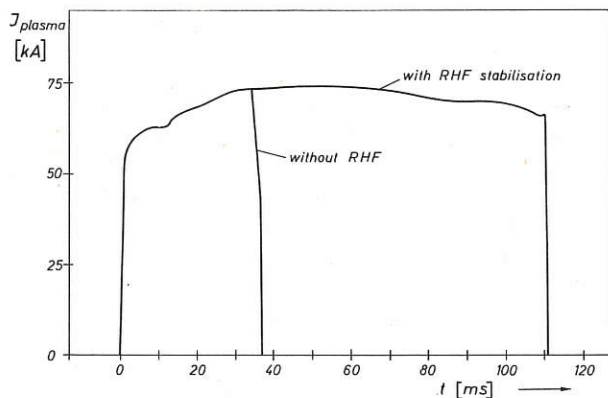


Abb. 4: Verbesserung des Stabilitätsverhaltens durch Anlegen eines resonanten helischen Feldes. Der Strom in den helischen Windungen erfüllt die Bedingungen $I_{hel} < I_{hel}^+, I_{hel}^+ - I_{hel} \ll I_{hel}^+$

¹⁾ P. Chrisman, J. Clarke, J. Rome, ORNL-TM-4501, 1974

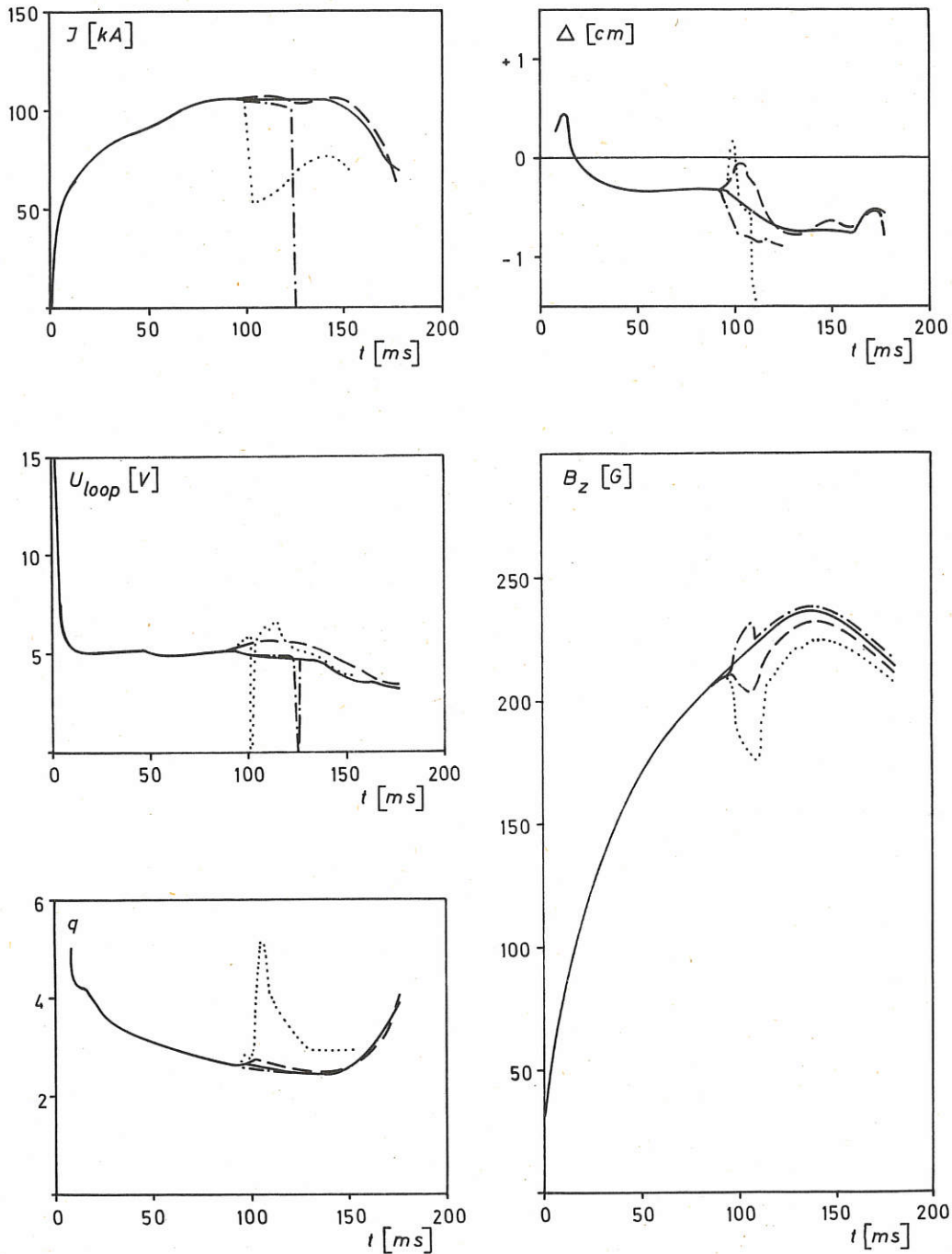


Abb. 2:
 Plasmastrom I ,
 Ringspannung U_{loop} ,
 Plasmaverschiebung Δ
 und Sicherheitsfaktor q
 für vier Entladungen
 mit unterschiedlichem
 Zeitverlauf
 des Vertikalfeldes B_z .
 Die bei $t = 100$ ms
 angelegte Störung
 in B_z führt in den
 Fällen und -.-.-
 zum Abbruch der
 Entladung.

mente mit helischen Wechselfeldern im Frequenzbereich 2–6 kHz, bei denen ebenfalls der kritische Wert überschritten werden konnte, ohne daß das Plasma instabil wurde.

— Der kritische helische Strom nimmt mit q (a) zu. In Abb. 5 ist die zur Inselbreite proportionale Größe $\sqrt{I_{hel}^+ / B_\phi}$ gegen q (a) aufgetragen. Die experimentell gefundene Zunahme der Inselbreite mit q (a) läßt sich nach *H. Wobig / 115 /* durch die Annahme erklären, daß die Abbruchinstabilität dann einsetzt, wenn die Inseln sich von der $q = 2$ -Fläche bis zum Plasmarand erstrecken. Das lie-

fert die durchgezogene Kurve: Je größer q (a) ist, um so weiter innen liegt die $q = 2$ -Fläche und um so größer muß dann die Inselbreite und somit I_{hel}^+ sein.

1.1.2 Plasmazusammensetzung

Die bisher gewonnenen Aussagen über die Plasmazusammensetzung stützen sich auf die Messung folgender Größen:

a) Z_{eff} : Aus dem gemessenen Widerstand und dem Elektronentemperaturprofil kann die (über den Plasmaquerschnitt gemittelte) effektive Kernladungszahl $Z_{eff} = \frac{\sum n_i Z_i^2}{n_e}$ bestimmt werden. Es ergeben sich Werte von

Zu 1.1.1. Abbruchinstabilität

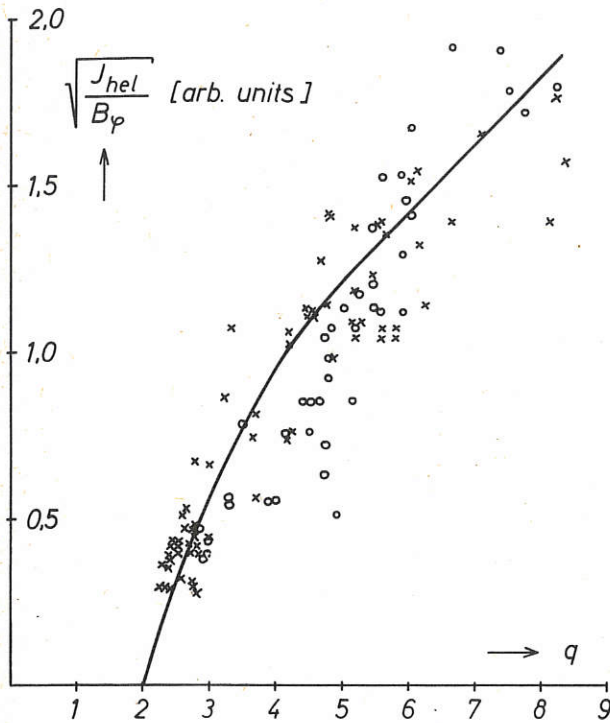


Abb. 5: Die zur Inselbreite proportionale Größe $\sqrt{J_{hel}^*/B_\phi}$ ist gegen q (a), den Stabilitätsfaktor am Plasmarand, aufgetragen. Die durchgezogene Kurve basiert auf der Hypothese, daß der Abbruch einsetzt, wenn die durch Resonanz mit der $q=2$ -Fläche erzeugten Inseln sich bis zum Plasmarand erstrecken.

$Z_{eff} = 4-12$, die im zeitlichen Verlauf der Entladung nahezu konstant bleiben. Die höheren Werte werden bei Entladung mit höherem Strom erreicht.

b) **Kontinuumstrahlung**: Die im weichen Röntgengebiet (0,8–30 keV) gemessene Kontinuumstrahlung ist um einen Faktor ζ stärker als die Bremsstrahlungsintensität, die man bei Annahme eines reinen Wasserstoffplasmas aus den gemessenen n_e - und T_e -Werten berechnet. Wäre die Kontinuumstrahlung reine frei-frei-Bremsstrahlung, müßte sich $\zeta = Z_{eff}$ ergeben. Häufig ist aber $\zeta > Z_{eff}$, was durch Beiträge der Rekombinationsstrahlung

von Verunreinigungsionen qualitativ erklärt werden kann.

c) **Linienstrahlung**: Im weichen Röntgengebiet wurden die K- und L-Linien des Wand- und Limitermaterials (Fe, Cr, Ni und Mo) gefunden. Es zeigte sich, daß Betrag und Zeitverlauf der K-Linien mit $h\nu \gg kT$ ganz empfindlich von den Entladungsbedingungen abhängen. Dies erklärt sich aus der Tatsache, daß diese Linien wesentlich nur durch den überthermischen Anteil der Elektronenenergieverteilung angeregt werden können. Aus der Absolutintensität der L-Linien ($h\nu \leq 3 kT$) wurde ein Verunreinigungsgrad durch Metalle von etwa 1%, bezogen auf die Elektronendichte, bestimmt. Diese Angabe ist allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet, da die Anregungskoeffizienten für diese Linien nur ungenau bekannt sind. Abb. 6 stellt einen typischen Fall für den zeitlichen Intensitätsverlauf einiger Röntgenlinien des Wand- und des Limitermaterials dar. Wie diese Abbildung zeigt, gelangt der überwiegende Teil der schweren Verunreinigungen bereits zu Beginn des Strompulses in die Entladung.

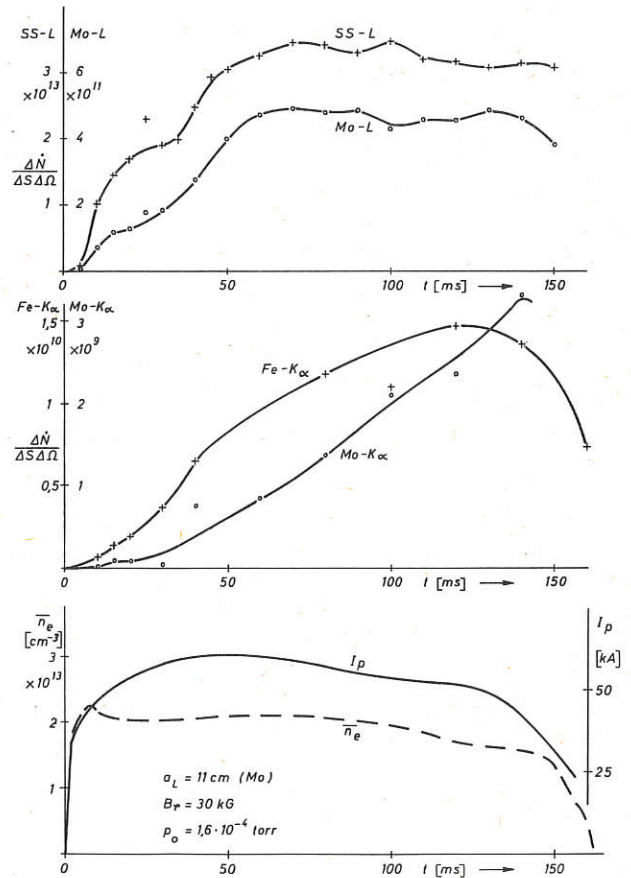


Abb. 6: Zeitverlauf der Emission von Eisen- und Molybdän-Röntgenlinien für eine Entladung mit niedriger mittlerer Elektronendichte n_e . Die L-Linien werden durch thermische Elektronen angeregt, so daß ihr Zeitverlauf dem der Dichte der schweren Verunreinigungen entspricht. Die K-Linien werden durch überthermische (bis 100keV) Elektronen angeregt, deren Anteil im Verlauf der Entladungen anwächst.

Im Vakuum-UV-Gebiet ($300 \text{ \AA} < \lambda < 2000 \text{ \AA}$) wurden ebenfalls Metall-Linien gefunden. Vorwiegend werden aber in diesen Bereich Linien der leichten Verunreinigungen (O, N, C) emittiert. Da noch keine Absoluteichung des UV-Spektrometers vorlag, können nur ungefähre Angaben über den Verunreinigungsgrad gemacht werden; sie ergeben sich aus dem relativen Vergleich von Spektren, die in Entladungen mit reiner Luftfüllung bzw. mit Wasserstoff aufgenommen wurden. Hiernach wird ein Gesamtverunreinigungsgrad durch Sauerstoff und Stickstoff von der Größenordnung 10% abgeschätzt.

Weitere Aufschlüsse über die Plasmazusammensetzung ergeben sich aus dem Vergleich von Fülldruck P_0 und mittlerer Elektronendichte. In der ersten Millisekunde steigt n_e sehr schnell auf einen Wert proportional P_0 an, um dann einem Plateauwert, der bei 10 bis 20 msec erreicht wird, zuzustreben. Die im langsamen Anstieg produzierte Dichte ist vom Fülldruck praktisch unabhängig und stammt wahrscheinlich von Teilchen, die beim „recycling“ von der Wand abgelöst werden. Es kann sich dabei sowohl um deponierten Wasserstoff als auch um Verunreinigungen handeln. Außerdem trägt auch der Zustrom von Wasserstoff aus den Totvolumina des Vakuumsystems merklich zur Elektronendichte bei.

1.2 Entwicklungsarbeiten

1.2.1 Messung des Poloidalfeldes über den Zeemann-Effekt (K. McCormick)

Die Grundlage des diagnostischen Verfahrens sowie die technischen Einzelheiten der Meßanordnung wurden bereits in den vorangegangenen IPP-Jahresberichten beschrieben.

Früheren Vereinbarungen gemäß wurde die Entwicklung von zwei verschiedenen Li-Ionenquellen – der einen in Garching und der anderen in Fontenay-aux-Roses – fortgesetzt. Nach Auftreten unerwarteter Schwierigkeiten bei der Erzeugung von Li-Plasmen der notwendigen Dichte wurden die Arbeiten an der Garchinger Quelle (Lisitano-Spule) vorläufig eingestellt, um dadurch Zeit für die Weiterentwicklung und Erprobung der Optik zu gewinnen.

Die Arbeiten an der Quelle in Fontenay-aux-Roses (β -Eucryptite) sind nach siebenmonatiger Pause wieder aufgenommen worden. Detailzeichnungen für eine Kanone mit einer Kathode von 3 cm Durchmesser sind erstellt und der Herstellungsauftrag wurde bei der Industrie vergeben.

Die Konstruktionsarbeiten für die Lithiumdampf-Umladungszelle wurden in Zusammenarbeit zwischen Garching und Fontenay-aux-Roses begonnen.

Zur Erleichterung der Konstruktion der Optik wurde ein kleines Rechenprogramm aufgestellt. Alle voraussagbaren Faktoren, die die Signalstärke beeinflussen könnten, lassen sich berücksichtigen, z. B. toroidale Feldstärke, Li-Strahlgeschwindigkeit, transversale Doppler-Verbreiterung der Linie Li 6708 Å, beobachtetes Plasmavolumen, Fabry-Perot-Bandbreite usw.

Die Ratenkoeffizienten für die Vorgänge, die zur Abschwächung eines Li-Strahles in einem Plasma führen, sind berechnet worden. Es liegen jedoch diesen Koeffizienten Wirkungsquerschnitte (Ladungsaustausch an H^+ sowie Ionisie-

rung durch Elektronen, Protonen und Verunreinigungsionen) zugrunde, die nicht besonders gut bekannt sind. Genauere Kenntnisse solcher Wirkungsquerschnitte sind wünschenswert, um die Anwendbarkeit der Li-Strahldiagnostik auf TOKAMAK-Anordnungen mit großem Plasmaradius ($> 20 \text{ cm}$) vorauszusagen. Dazu wird eine Schmierkamera mit Photomultiplier gebaut, um die ausgestrahlte Lichtstärke bei 6708 Å entlang des Li-Strahles auszumessen. Daraus sollte sich für verschiedene Plasmabedingungen im PULSATOR der gesamte Strahlabschwächungskoeffizient entnehmen lassen.

Insofern sich die Anregungsrate für die Li-Linie 6708 Å als schwache Funktion der Temperatur erweist, liefert die Messung der ausgestrahlten Lichtstärke entlang des Strahles eine relative Bestimmung der örtlichen Elektronendichte. Dieser Effekt läßt sich zur Untersuchung niederfrequenter Dichteschwankungen, die z. B. mit MHD-Moden zusammenhängen, sowie zur Messung des Dichtegradienten in den äußeren Plasmabereichen niedriger Dichte anwenden. Die dazu erforderlichen diagnostischen Mittel sind in Vorbereitung.

1.2.2 Neutralteilchenanalysator

(M. Brusati, B. Cannici, R. C. Wharton¹⁾)

Ein Fünf-Kanal-Impulsanalysator befindet sich in Konstruktion. Die Energien der Kanäle verhalten sich wie 2 : 3 : 4 : 5 : 20, so daß vier Kanäle für den thermischen und einer für den überthermischen Anteil der Energieverteilung zur Verfügung stehen. Aus physikalischen Gründen beträgt die niedrigste Einstellung 200 eV : 300 eV : 400 eV : 500 eV : 2 keV, während die Energie nach oben technisch durch 1 keV : 1,5 keV : 2 keV : 2,5 keV : 10 keV begrenzt ist. Die niedrigste Iontemperatur, die nachgewiesen werden kann, dürfte etwa 150 eV betragen.

Für die Umladestelle ist Sauerstoff wegen des bei niedrigen Energien besonders günstigen Wirkungsquerschnitts vorgesehen. Die Impulsanalyse erfolgt magnetisch. Das Profil des Magneten ist so gewählt, daß die Teilchenstrahlen in erster Ordnung auf den Eingang des Detektors fokussiert werden. Ein Sperrgitter sorgt für Massendiskriminierung. Die Ionen werden indirekt durch einen aluminiumbeschichteten Scintillator nachgewiesen, der an einen Photomultiplier angeschlossen ist. Die Photokathode liegt auf Hochspannung, so daß das Ausgangssignal direkt von der Anode ausgekoppelt werden kann. Das System kann in einer zur Torusachse senkrechten Ebene radial auflösen.

1.2.3 HF-Vorionisierung

(G. Lisitano, S. Corti, P. Morandi)

Im Berichtsjahre wurde eine weiterentwickelte HF-Antenne mit Erfolg eingesetzt, die zugleich als Limiter diente. Mit einer Impulsleistung von 6 kW im S-Band konnte eine mittlere Elektronendichte von $6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ erzeugt werden. Die Messung der Dichteverteilung zeigte, daß der gesamte Gefäßquerschnitt mit Plasma gefüllt ist, wobei der Dichteschwerpunkt vor der Stromentladung wie erwartet nach außen verschoben ist.

Als nächster Schritt ist ein Antennen-Limiter mit Gaszufuhr entwickelt worden, der sowohl passiv (d. h. ohne

¹⁾ Gastforscher aus Bereich Laserfusion und Wellenheizung.

HF-Impuls) als auch aktiv betrieben werden kann. Dieses System soll eine verunreinigungsarme Startphase ermöglichen. Es wird z. Zt. an der linearen Hilfsmaschine ZANZARA getestet. ZANZARA hat den gleichen Innendurchmesser und das gleiche Hauptmagnetfeld wie PULSATOR (maximal 28 kG gepulst) und dient in erster Linie der Erprobung weiterer HF-Strukturen und neuer Diagnostikvorrichtungen für PULSATOR.

1.2.4 Elektronikentwicklung

(H. Hohenöcker, D. Groening, J. Hartmann, K. H. Knauer, P. Luttner, P. Pollner)

Für P 1 wurden folgende Hardware-Interface bzw. Elektronik entwickelt und in Betrieb genommen.

- a) Interface für Mikrowellen-Interferometer: Durch das Interface ist es möglich, die Interferenzstreifen von 8 Interferometerkanälen automatisch zu zählen und den Wert zwischenspeichern. Wenn der Prozeßrechner PDP 11/45 die On-Line-Daten erfaßt hat, wird nach dem Schuß der Zwischenspeicher ausgelesen und über das Bildschirmterminal in Kurvenform ausgegeben.
- b) Die statischen Maschinenparameter (16 Kanäle) wurden in Betrieb genommen. Hierbei wurden von jedem Kanal je ein Meßwert vor und einer nach der Entladung aufgenommen und die Meßwerte über den Lineprinter in Form eines Protokolls ausgegeben.
- c) Die Röntgenstrahl-Filtermethode wurde fertiggestellt und statisch ausgetestet. Hierbei wurden die von einem Multiplier gelieferten Impulse dem jeweiligen Filter zugeordnet, gezählt und in einem schnellen RAM-MOS-Speicher zwischengespeichert. Die Menge der Meßwerte ist in Gruppen von 32 bis 224 einstellbar. Ausgelesen wird der Speicher, wenn der Rechner die On-Line-Datenaufnahme beendet hat.
- d) 8 „schnelle“ Kanäle wurden als OPTO-Koppler eingesetzt. 8 weitere „schnelle“ Kanäle wurden für dipolare Signale modifiziert und zum Teil in Betrieb genommen.

Weiter wurden folgende Geräte entwickelt, gebaut und eingesetzt:

- a) Für das Mikrowellen-Interferometer wurden Vorverstärker gebaut. Ferner wurden die Verstärker umgebaut und die Vektoranalysatoren mit mehrkreisigen Bandfiltern ausgerüstet.
- b) Es wurde ein sehr breitbandiger analoger OPTO-Koppler entwickelt, dessen Übertragungsbereich von DC bis über 1 MHz reicht. Dieser wird 1975 eingesetzt werden.
- c) Für Strommessungen im Sekundenbereich wurden sehr stabile Integriertoren mit Zeitkonstanten bis zu 10 sec gebaut und eingesetzt.
- d) Für die 16 Transient-Recorder wurde ein Multiplexer entwickelt, der es ermöglicht, alle 16 Signale auf einen Monitor zu bringen. Für die magnetischen Sonden wurden ein Präzisionsgleichrichter, 2 Logarithmierer und ein Frequenz-Spannungswandler in einem Einschubgehäuse für das Tektronix Meßsystem 500 gebaut.

Darüber hinaus fielen zahlreiche Arbeiten für Steuerung, Überwachung und Diagnostik an, die sich aus dem laufenden PULSATOR-Betrieb ergaben.

1.3 PML-Vorschlag

(R. Allgeyer, W. Feneberg, J. Gernhardt, F. Karger, M. Keilhacker, O. Klüber, K. Lackner, D. Meisel, S. Sesnic, H. P. Zehrfeld)

Mit PML (PULSATOR mit magnetischem Limiter) soll ein Vor- und Begleitexperiment zu ASDEX etabliert werden mit der Aufgabe, Zündung und Stromaufbau sowie Gleichgewichts- und Stabilitätsverhalten eines von einer Separatrix als magnetischem Limiter begrenzten Plasmas in ASDEX-ähnlicher Geometrie zu untersuchen. Die ASDEX-Ähnlichkeit soll darin bestehen, daß die Separatrix ebenfalls durch zwei zur Mittelebene symmetrische Triplets auf der Innenseite des Torus erzeugt wird. Eine weitere Randbedingung ist – gegeben durch den Wunsch nach möglichst baldiger Inbetriebnahme – die Weiterverwendung von Hauptfeldspulensatz, Transformator und Energieversorgung der PULSATOR-Anlage. Schließlich soll auch der Plasmaradius etwa dem von PULSATOR gleich sein, um das Aspektverhältnis nicht zu groß werden zu lassen und einen Vergleich mit den PULSATOR-Resultaten zu ermöglichen.

Die Hauptschwierigkeit in der Erfüllung dieser Forderungen besteht darin, daß aus Platzgründen alle Multipolleiter – anders als bei ASDEX – auf einem Kreis angeordnet werden müssen. Es gelang trotzdem, eine Konfiguration zu finden, die bezüglich Position der Stagnationspunkte und Lage und Ausdehnung des stabilen Bereiches hinreichend ASDEX-ähnlich und technisch sicher zu realisieren ist. Ein Projektvorschlag wurde erarbeitet und von der Wissenschaftlichen Leitung des Instituts genehmigt.

Die im Laufe des Berichtsjahres am PULSATOR mit den helischen Windungen erzielten Ergebnisse machen eine Erweiterung der am PULSATOR (nur ein Windungssatz $\ell = 2$, $n = 1$) gegebenen experimentellen Möglichkeiten dringend erforderlich – insbesondere, um die sogenannte „internal disruption“ ($\ell = 1$, $n = 1$) aktiv beeinflussen zu können. Eine Überprüfung des PML-Entwurfs führte zu dem erfreulichen Ergebnis, daß PML zusätzlich mit mehreren Sätzen helischer Windungen versehen werden kann, ohne daß am ursprünglichen Konzept Abstriche gemacht werden müssen. PML ist somit eine außerordentlich vielseitig verwendbare Anlage. Besonders hervorzuheben ist dabei, daß die simultane Verwendung von Multipol- und helischen Windungen ganz neuartige Aufschlüsse über die Rolle der Randzonen für das Stabilitätsverhalten liefern wird.

Abb. 7 ist eine maßstäbliche Skizze vom Querschnitt des PML-Gefäßes. Durch Weglassen der Kupferschale und des Liners wird innerhalb der PULSATOR-Hauptfeldspulen Platz sowohl für Multipol- und Vertikalfeldwindungen als auch für mehrere Sätze von helikalen Windungen mit verschiedenen ℓ - (1, 2, 3 ...) und n -Werten gewonnen. Die Energieversorgung der Multipolspulen erlaubt innerhalb der eingezeichneten größtmöglichen Separatrix Plasmaströme bis etwa 70 kA für maximal 60 ms.

Die diagnostischen Öffnungen werden gegenüber der jetzigen PULSATOR-Anlage durch Anbringen zusätzlicher Stützen noch vermehrt werden.

(Abb. 7 siehe Seite 42!)

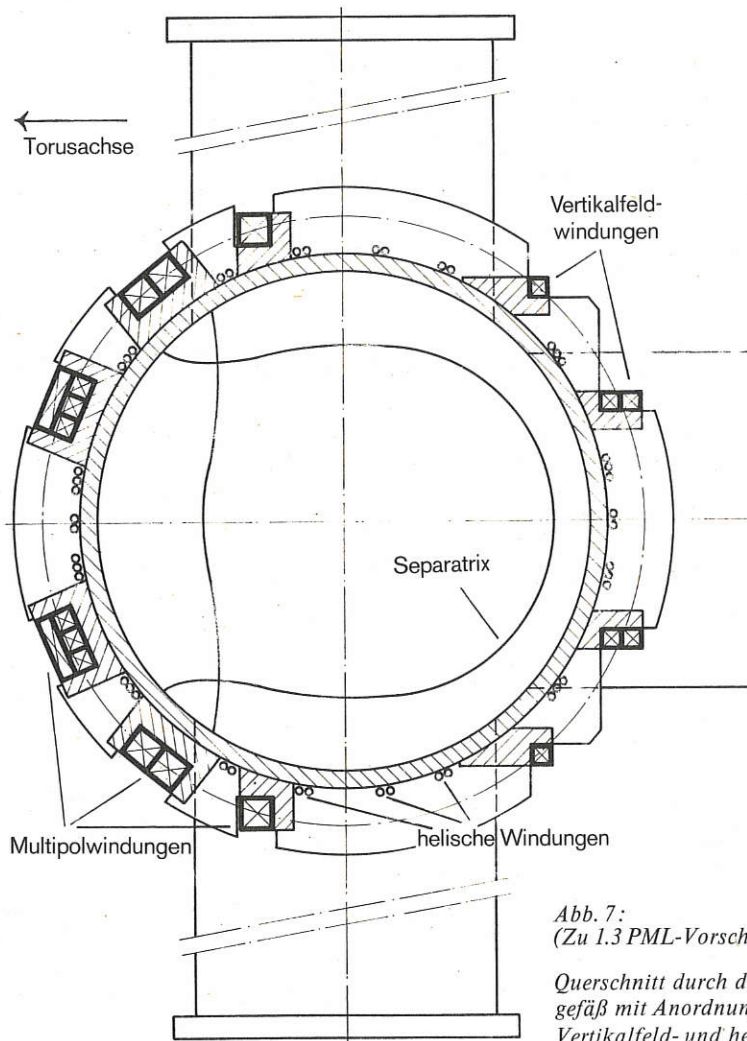


Abb. 7:
(Zu 1.3 PML-Vorschlag):
Querschnitt durch das PML-Vakuum-
gefäß mit Anordnung der Multipol-,
Vertikalfeld- und helikalen Leiter

1.4 Theorie

(B. J. Green¹⁾, H. P. Zehrfeld)

Für Konfigurationen mit magnetischem Limiter (ASDEX, PDX, PML) wurden Teilchentransport und Stabilität unter Berücksichtigung endlicher elektrischer Leitfähigkeit des Plasmas untersucht. Für bestimmte Temperaturverteilungen existieren mit dem Transport von Plasma konsistente, exakte Gleichgewichtslösungen, für die zur Aufrechterhaltung eines stationären Zustandes der Weggang von Plasma über die Separatrix durch Quellen im Inneren kompensiert werden muß. Es wurden Feldlinienbilder der zugehörigen Plasmaströmung berechnet. Nach Betrachtung poloidal linienhafter Quellverteilungen werden jetzt räumlich verteilte Teilchenquellen zugrundegelegt, um für die quellenabhängige Topologie der Strömungslinien des Plasmas realistische Ergebnisse erwarten zu können.

Rechnungen in Princeton für PDX-artige Konfigurationen haben ergeben, daß für gegebenes q in der Nähe der magnetischen Achse ein Plasma zum Rande hin ideal stabil, aber resistiv instabil sein kann. Für die von uns betrachteten Gleichgewichte konnte dieser Befund durch Auswertung des entsprechenden Kriteriums (resistive interchange) für lokalisierte Störungen nicht bestätigt werden.

¹⁾ Bereich Theorie, z. Zt. JET Design Group

²⁾ Bereiche Theorie und Plasma-Wand-Wechselwirkung

2. DIVERTOR-TOKAMAK ASDEX

(M. Keilhacker, R. Allgeyer, E. Broser, W. Feneberg, H. Finkelmeyer, F. Gresser, R. Griek, G. Haas, F. Hartz, G. Herppich, O. Jandl, G. Klement, M. Kornherr, K. Lackner²⁾, H. Niedermeyer, W. Poschenrieder²⁾, H. Preis, H. Rapp, E. Rebhahn²⁾, F. Schneider, G. Siller, H. Wedler, F. Werner, F. Wesner)

Im Februar 1974 wurde von der Wissenschaftlichen Leitung das Projekt ASDEX (Axially Symmetric Divertor EXperiment) eingerichtet, und zwar mit zunächst neun wissenschaftlichen Mitarbeitern. Diese Zahl stieg bis Ende 1974 auf 16 Wissenschaftler und 6 Ingenieure an. (In der Planung für 1974 waren 24 Wissenschaftler und 9 Ingenieure vorgesehen.)

In den ersten Monaten 1974 wurde der bereits 1973 erarbeitete Projektvorschlag ASDEX soweit ausgearbeitet und ergänzt, daß er im Juni 1974 der TOKAMAK Advisory Group in einem Workshop zur Begutachtung vorgelegt werden konnte. Im September 1974 wurde das Projekt von der Groupe de Liaison endgültig genehmigt.

Die physikalische Zielsetzung – Untersuchung der Wirksamkeit eines Divertors zur Reduzierung der Plasmaverunreinigungen – und das physikalisch-technische Konzept

des Experiments sind im einzelnen im ASDEX-Proposal Teil I (Okt. 73) und Teil II (Juni 74) sowie in einem Tagungsbeitrag /1/ beschrieben. Hier soll zunächst über den Stand der technischen Planung und anschließend über einige Überlegungen und Untersuchungen zum physikalischen Konzept des Experiments berichtet werden.

2.1 Technisches Konzept

Die wichtigsten Daten des Experiments sind:

Großer Radius	$R = 165 \text{ cm}$
Plasmaradius	$a = 40 \text{ cm}$
Toroidales Magnetfeld	$B = 2.8 \text{ Tesla}$
Plasmastrom	$I_p = 500 \text{ kA}$
Pulsdauer	$t \approx 5 \text{ s}$

Abb. 8 zeigt einen Schnitt durch eine Experimenthälfte. Das toroidale Magnetfeld wird von 16 D-förmigen Spulen erzeugt, die sich innen gegen eine zentrale Säule abstützen und deren Kippkräfte oben und unten in ein Gerüst eingeleitet werden. Innerhalb der Hauptfeldspulen befinden sich das Vakuumgefäß mit den beiden Divertorkammern und

den entsprechenden Multipolspulen (M) sowie die axial-symmetrischen Spulen zur Induzierung des Plasmastromes (OH) und zur Erzeugung der Vertikal- und Multipolkompensationsfelder (V und MC). Das gesamte Experiment ist entlang eines großen Durchmessers in zwei Hälften teilbar, von denen eine zur Montage auf Schienen weggefahren werden kann.

Terminlich liegen die Arbeiten im Rahmen der ursprünglichen Planung, so daß bei entsprechender Unterstützung eine Fertigstellung des Experiments Ende 1977 möglich erscheint.

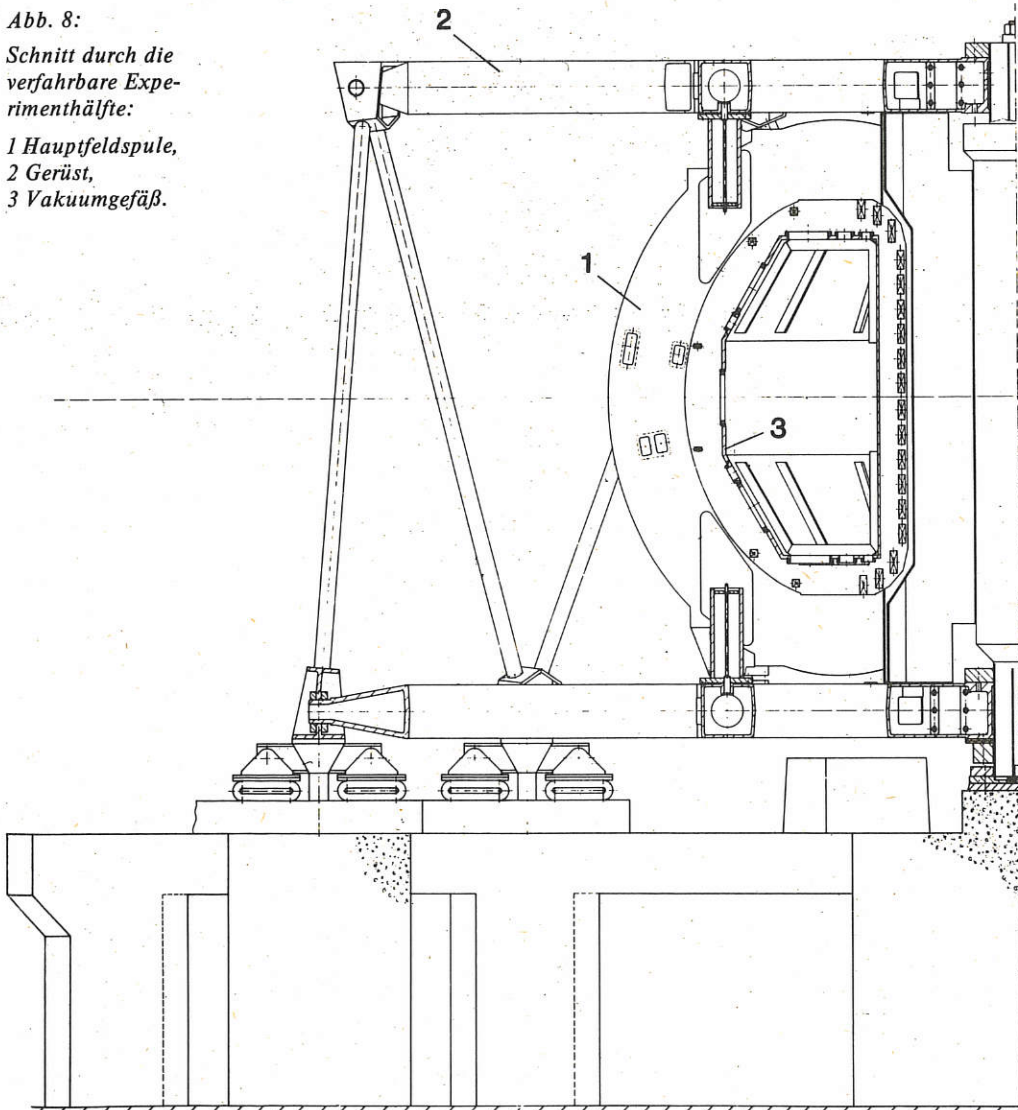
2.1.1 Hauptfeldspulen

Ausgehend von den technischen Grundvorstellungen des ASDEX-Projektvorschlages wurde für das Hauptfeld-Spulen-system eine allen physikalischen und technischen Anforderungen entsprechende Lösung erarbeitet. Fertigungsprobleme und offene Fragen bezüglich der mechanischen Belastbarkeit einzelner Materialien wurden in einer Studie von der Firma *Siemens* behandelt. Die Konstruktion wurde von den Zentralen Technischen Einrichtungen (ZTE) des In-

Abb. 8:

Schnitt durch die verfahrbare Experimenthälfte:

- 1 Hauptfeldspule,
- 2 Gerüst,
- 3 Vakuumgefäß.



stituts durchgeführt. Der Auftrag wurde Ende 1974 der Firma BBC erteilt, die alle benötigten Spulen bis Ende 1976 im Werk Oerlikon (Schweiz) herstellen wird.

Das Spulensystem besteht aus 16 gleichen D-förmigen Spulen, die sich entlang des geraden Teils an einer zentralen Säule abstützen. Die Kupferwicklung bildet eine kompakte Einheit; sie ist in einem Edelstahlgehäuse, das sie allseitig umgibt, entlang der gekrümmten Außenseite elastisch gelagert und berührt das Gehäuse nur an den beiden ebenen Seitenflächen und an der geraden Anlagefläche. Dieses Konzept ermöglicht eine freie Ausdehnung der Wicklung bei Erwärmung, eine einwandfreie Übertragung der Zentripetalkraft an die zentrale Säule sowie der Kippkräfte (Lorentz-Kräfte auf die Hauptfeldspule infolge poloidaler Magnetfelder) zum Gerüst, das die Spulen oben und unten an je zwei Stellen seitlich abstützt. Die seitliche Versteifung der Spulen ist notwendig. Das vor allem zur Versteifung, aber auch zur Befestigung axialsymmetrischer Spulen vorgesehene Gehäuse schränkt im Gegensatz zu anderen Lösungen die Zugänglichkeit zum Entladungsgefäß kaum ein.

Die Eigenkräfte des Spulensystems werden vom Kupferpaket aufgenommen. Seine Form wurde so optimiert, daß die Biegebeanspruchung unter der zulässigen Grenze liegt. Es zeigte sich, daß die Optimierung sehr weit getrieben werden muß. Ferner wurde deutlich, daß an den Enden der starren Anlageflächen prinzipiell im Kupferpaket Schubspannungen auftreten, die durch eine Optimierung der Spulenform nicht abgebaut werden können, im vorliegenden Fall jedoch noch innerhalb der zulässigen Grenzen liegen.

Die Spulen erwärmen sich bei einer Entladung um maximal 40° C und werden in den Pausen wieder abgekühlt. Der Kupferleiter hat dafür im Zentrum des Querschnitts eine kreisförmige Kühlbohrung, die von Wasser durchströmt wird. Jede Spule ist in sechs getrennte Kühlkreise aufgeteilt. Numerische Rechnungen zeigten, daß eine direkte Einspeisung von kaltem Wasser in die heißen Spulen zu sehr großen Temperaturgradienten und unzulässigen mechanischen Spannungen führt. Das Wasser zirkuliert deshalb ständig in den Spulen und wird in den Pausen durch Zumischen von kaltem Wasser langsam abgekühlt. Die wichtigsten Spulendaten sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Maximaler Betriebsstrom	45 kA
Magnetfeld bei $r = 1.65$ m	2.8 Tesla
Magnetfeldenergie	237 MJ
Dissipierte Energie maximal	1,5 GJ
Zeitkonstante L/R	4 s
Ripple im Gefäßbereich	< 2%

Im Rahmen der Arbeiten wurde das Rechenprogramm HEDO erstellt, das die räumliche Verteilung des Magnetfelds und der Lorentz-Kraft sowie die Induktivität eines Spulensystems berechnet, das aus nichtkreisförmigen Einzelspulen aufgebaut ist. Die mechanische Spannungsanalyse von Spulenpaket und Gehäuse wurde mit dem Finite-Element-Programm STRUDL durchgeführt.

2.1.2 Gerüst

Das Gerüst dient zur Halterung der Hauptfeldspulen, nimmt die auf die Hauptfeldspulen wirkenden magnetischen Kräfte

(Zentripetal- und Kippkräfte) auf und überträgt das Gewicht des Experiments auf das Fundament. Es besteht aus einem zentralen Stützkörper, einer oberen und unteren Abdeckplatte, einem Außenmantel und einer Verfahrenrichtung für eine Gerüsthälfte (Abb. 8). Die Berechnungen und Konstruktionsarbeiten zum Gerüst wurden von der Firma INTER-ATOM in enger Zusammenarbeit mit dem IPP durchgeführt.

Der zentrale Stützkörper, der die Zentripetalkräfte ($1.14 \cdot 10^6$ kg pro Spule) und ein gewisses Torsionsmoment aufnehmen muß, ist eine 16-eckige Säule, die zur Vermeidung von Wirbelströmen (bei Stromänderungen im OH-Trafo) aus verleimten OBO-Festholzscheiben aufgebaut ist. Angepaßte Zwischenlagen zwischen Säule und Hauptfeldspulen sollen eine möglichst exakte Anlage der Hauptfeldspulen am zentralen Stützkörper gewährleisten, da bereits bei geringer Durchbiegung des geraden Spulenteils im Kupferpaket erhebliche Schubspannungen auftreten.

Die obere und untere Abdeckplatte bestehen aus einem scheibenartigen Innenteil aus austenitischem Grauguß, das zur Vermeidung von Stromschleifen in acht voneinander isolierte Segmente aufgeteilt ist, und 16 Kastenprofilträgern aus dem gleichen Werkstoff, welche die Scheibe mit dem Außenmantel des Gerüsts verbinden.

Um eine gute Zugänglichkeit zum Experiment zu gewährleisten, wurde der Durchmesser des Gerüstaußenmantels so groß gewählt, daß zwischen Hauptfeldspulen und Außenmantel ein etwa 2 m breiter Umgang erhalten bleibt. Der Außenmantel wurde als Fachwerk ausgebildet, bei dem die acht Knotenpunkte der oberen Abdeckplatte mit den um 22.5° versetzten Knotenpunkten der unteren Abdeckplatte durch reine Zug-Druck-Stäbe verbunden sind.

2.1.3 Vakuumgefäß

Die Konstruktion des Vakuumgefäßes konnte weitgehend fertiggestellt werden. Der Gefäßquerschnitt wurde durch Abschrägen des oberen und unteren Außenbereichs der endgültigen Form der Hauptfeldspulen angepaßt. Das Gefäß besitzt 10 Mannlöcher (Nennweite 600) für Montage, Neutralteilcheneinschuß und Diagnostik und zahlreiche Öffnungen mit Nennweiten zwischen 35 und 350 mm für Pumpstutzen, Diagnostik, Stromzuführungen usw. Der obere und untere Divertor sind durch Trennbleche vom Plasmabereich abgetrennt und durch Spanten für die Aufnahme der Multipolspulen in je 16 Divertorkammern aufgeteilt. Die Divertoreinbauten sitzen in austauschbaren Einsätzen mit gekühlten Außenwänden, um eine thermische und mechanische Trennung vom Vakuumgefäß zu ermöglichen.

Das Gefäß besteht aus zwei 180°-Bögen, die über zwei Isolierspalte aus Polyimid verbunden sind. Um die günstigste Konstruktion des Isolierspalts an der Gefäßinnenseite zu finden, wurden Vorversuche zur Spannungsfestigkeit unter realistischen Bedingungen (Magnetfeld, Plasmabeschuß) durchgeführt.

Das Gefäß soll bis 150°C ausgeheizt werden. Dazu werden an der Gefäßaußenseite ein Wasserdruckrohrsystem und eine 2,5 cm dicke Wärmeisolation aufgebracht. Die beim Ausheizen in der Gefäßwand auftretende Temperaturverteilung wurde berechnet. Die mechanische Festigkeit der Konstruktion konnte durch erste Rechnungen, die mit einem Finite-Element-Programm durchgeführt wurden, bestätigt werden.

2.1.4 Divertorpumpsystem

Um die Gasrückströmung aus dem Divertor auf den Bruchteil R_{H2} zu reduzieren, ist im Divertor die Saugleistung

$$S = L \left(\frac{1 - \sigma_H}{R_{H2}} - 1 \right)$$

notwendig. Dabei sind L der Leitwert der Divertorschlitze und σ_H der kinetische Absorptionskoeffizient (*trapping efficiency*) der Prallplatten für die Plasmaionen. Der Leitwert L beträgt $6 \cdot 10^5$ l/sec für eine Schlitzbreite von 5 cm und eine Länge des Divertorhalses von 10 cm.

Für das Pumpsystem im Divertor haben sich zwei Konzepte herauskristallisiert, nämlich geheizte Volumengetter, die Wasserstoff reversibel pumpen, oder Ti-Sublimation auf fl. N_2 -gekühlte Getterflächen. Zur Zeit laufen zwei Forschungsaufträge an die Industrie, um die Vor- und Nachteile beider Systeme festzustellen. Bis Ende 1975 soll die Entscheidung zwischen beiden Konzepten getroffen werden.

a) Volumengetter

Es sind ST 101 beschichtete Getterpatronen (SAES, Mailand) vorgesehen. Diese werden bei 200 bis 400°C betrieben und benötigen zur Reaktivierung Temperaturen von 600 bis 700°C. Aus räumlichen, leistungsmäßigen und finanziellen Gründen kann nur eine Saugleistung von $1-2 \cdot 10^6$ l/sec installiert werden. Um trotzdem auf ein Rückströmverhältnis $R_{H2} = 0,1$ zu kommen, müssen die Prallplatten einen erheblichen Teil des auftreffenden Plasmas kinetisch absorbieren (großes σ_H). Sie sollen deshalb aus Zr bestehen (s. a. Berichtsteil „Plasma-Wand-Wechselwirkung“!). Im Forschungsauftrag sollen die optimale räumliche Anordnung im Hinblick auf günstige Leitwerte und geringe thermische Belastung ermittelt und Sicherheitsprobleme (ST 101 ist pyrophor) untersucht werden.

b) Ti-Sublimationspumpen

Mit Ti-Sublimationspumpen ist die für $R_{H2} = 0,1$ notwendige Saugleistung auch ohne kinetische Absorption in den Prallplatten ($\sigma_H = 0$) zu erreichen. Sie beträgt ca. $6 \cdot 10^6$ l/sec. Bei fl. N_2 -Kühlung kann man für Wasserstoff mit einer spezifischen Saugleistung von 10 l/sec cm^2 rechnen, d. h. es ist eine Getterfläche von $6 \cdot 10^5$ cm^2 notwendig, die durchmäßige Faltung der Wände der Divertoreinsätze erzielt werden kann. Als Verdampfer werden Elektronenstrahlverdampfer, der strahlungsgeheizte Ti-Ball von Varian und direkt geheizte Ti/Mo-Drähte in Betracht gezogen.

Der Forschungsauftrag umfaßt die Prüfung kommerzieller Verdampfer und falls notwendig, die Entwicklung eines eigenen Verdampfers sowie die Untersuchung der Hafteigenschaften von Ti-Schichten.

2.1.5 Axialsymmetrische Spulen

Axialsymmetrische Spulen sind die zwischen Hauptfeldspulen und Vakuumgefäß sitzenden OH-, Vertikalfeld (V)- und Multipolkompensationsspulen (MC) sowie die im Vakuumgefäß sitzenden Multipolspulen (M) – siehe Abb. 9. Für alle axialsymmetrischen Spulen wurden Konstruktionskonzepte entwickelt und mit der detaillierten Konstruktion begonnen.

Die Multipolspulen besitzen kreisförmige Querschnitte und sind aus 4 bzw. 8 Windungen mit kreisausschnittförmigen Querschnitten aufgebaut. Sie haben vakuumdichte Män-

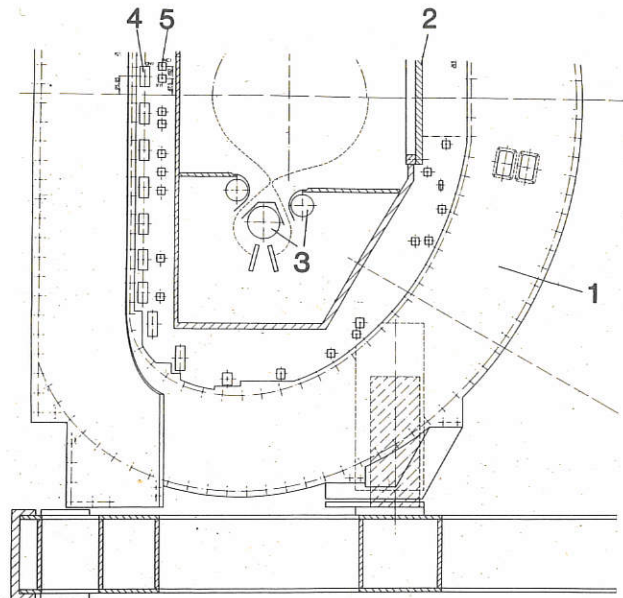


Abb. 9: Viertelschnitt durch das Experiment: 1 Hauptfeldspule, 2 Vakuumgefäß, 3 Multipolspulen, 4 OH-Spulen, 5 Vertikalfeld- und Multipolkompensationsspulen.

tel aus je 16 Bälgen und 16 festen Ringen. Die Spulen sind an diesen Ringen über federnde Elemente so an den Spannen des Vakuumgefäßes befestigt, daß sie sich bei Erwärmung ausdehnen können und nur vertikale Kräfte auf das Vakuumgefäß übertragen werden.

Der 100-windige OH-Transformator besteht aus 24 Einzelspulen mit Windungszahlen zwischen 1 und 6; sie sind so um das Vakuumgefäß verteilt angeordnet, daß ein minimales Streufeld im Plasmabereich entsteht. Die OH-Spulen und die einwindigen V- und MC-Spulen werden an den Rahmen der Hauptfeldspulen befestigt; sie können sich in radialer Richtung ausdehnen, so daß nur vertikale Kräfte auf die Hauptfeldspulen übertragen werden.

Alle axialsymmetrischen Spulen sind aus Halbspulen mit trennbaren, verschraubten Windungsverbindungen aufgebaut. Um diese Verbindungen unter wirklichkeitsgetreuen Verhältnissen testen zu können, wurde ein Vorversuch aufgebaut.

2.1.6 Stromsteller für die Vertikalfeldspulen

Der Energieinhalt des Vertikalfeldes beträgt max 350 kJ und soll in einer Zeit von 20 ms hochgeregt werden. Hierfür ist eine Leistung von etwa 40 MW notwendig. Eine unabhängige Quelle für diese Leistung steht im IPP nicht zur Verfügung. Deshalb wurde nach einer Lösung gesucht, die für die Erregung der Vertikalfeldspulen notwendige Leistung über die Hauptfeldspulen zu erbringen. Dies geschieht durch Serienschaltung der Hauptfeldspulen mit den Vertikalfeldspulen (Abb. 10). Erstere dienen als Stromquellen und liefern den eingepreßten Strom i_H . Ein gesteuerter Nebenschlußpfad bestimmt das Verhältnis der Ströme i_V und $i_H - i_V$.

Für die Ausführung der steuerbaren Spannungsquellen S1 bis S3 wurden verschiedene Möglichkeiten mit nicht stetig arbeitenden Stellgliedern untersucht:

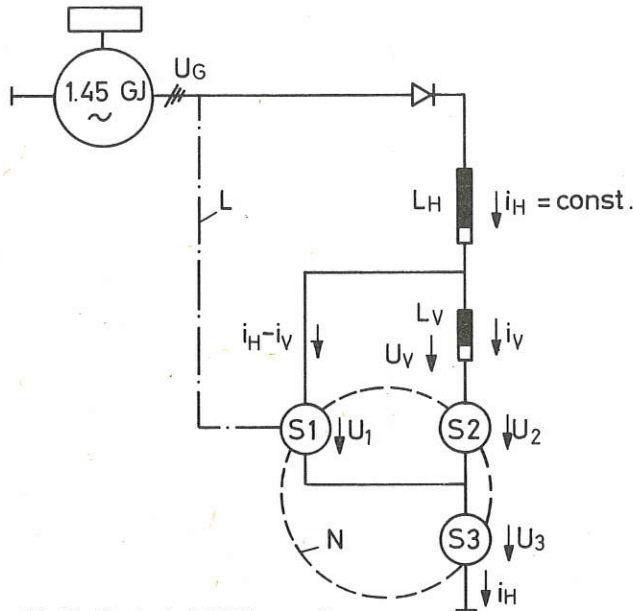


Abb. 10: Blockschaltbild Stromsteller

- Ein DC-Chopper mit den verlustbehafteten Spannungsquellen S 1 und S 2.
- Ein konventionelles Stromrichtersystem, das von einem künstlichen Drehstromnetz N geführt wird, welches den Energieaustausch zwischen den verlustfreien Quellen ermöglicht.
- Ein vom Stoßgenerator über die Leitung L geführter Stromrichter S 1 in Nebenschlußschaltung zum Vertikalfeld. Der durch das Hauptmagnetfeld voll ausgelastete Stoßgenerator würde zusätzlich nur mit Blindleistung belastet und wäre im Flat-Top ($i_V \approx i_H$) frei von zusätzlicher Last.

Die drei Vorschläge unterscheiden sich hinsichtlich der technischen, finanziellen, betrieblichen und experimentellen Aspekte deutlich. Allen Vorschlägen ist gemeinsam, daß der Vertikalfeldstrom stets kleiner oder gleich dem Hauptfeldstrom bleibt.

Nach sorgfältiger Abwägung aller Gesichtspunkte und der Prüfung durch die Fa. SIEMENS, ob die zusätzliche Belastung des Generators mit Blindstrom möglich ist, wurde der Vorschlag c) als der vorteilhafteste ausgewählt und für eine Ausschreibung ausgearbeitet.

2.2 Theoretisch-physikalische Untersuchungen

2.2.1 Einfluß des Divertors auf die Verunreinigung des Plasmas

Es wurde eine Gleichung aufgestellt, die das zeitliche Verhalten der mittleren Metallionenkonzentration im Plasma berücksichtigt:

- Zerstäubung an den Blenden zum Divertoreingang durch Plasmaionen;
- Zerstäubung an den Prallplatten im Divertor durch Plasmaionen;
- Zerstäubung an der Wand durch Umladungsneutrale, die aus der Wechselwirkung des an den Blenden neutralisier-

ten Plasmas und des aus dem Divertor zurückströmenden Gases mit Plasmaionen resultieren;

- Zerstäubung an den Blenden und im Divertor durch Verunreinigungen, die im Plasma aufgeheizt wurden und aus dem Plasma herausdiffundieren;
- Zerstäubung der Wand durch Umladungsneutrale, die bei Nachfüllung mittels Neutralinjektion entstehen, a) durch Umladung schneller Neutraler im Plasma und b) durch Umladung des aus den Injektoren einströmenden Gases am Plasma.

Dagegen bleiben Verdampfung z. B. durch runaway-Elektronen und die Zündphase außer Betracht.

Unter günstigen Umständen – d. h. einem Gasrückstromverhältnis aus dem Divertor von 0,05, einer praktisch vollständigen Aufnahme der Abschältschicht durch die Divertorschlitze und ohne den Beitrag der Neutralinjektion – steigt die Metallionenkonzentration zunächst um 1,5‰ pro Einschlußzeit für Wasserstoffionen an und erreicht nach einer Einschlußzeit für Metallionen eine Sättigung. Behandelt man mit dem gleichen Modell ein konventionelles TOKAMAK, so ergibt sich zu Beginn ein Anstieg, der um mehr als eine Größenordnung höher liegt als beim Divertor-TOKAMAK und danach eher ein exponentielles Anwachsen als eine Sättigung. Berücksichtigt man allerdings auch die Effekte bei der Neutralinjektion, so kann die Verbesserung auf einen Faktor 2 zusammenschrumpfen.

Die Gleichung läßt sich auch getrennt nach den Beiträgen von der Wand, den Blenden und den Prallplatten auswerten. Daraus lassen sich dann Aussagen über die Zusammensetzung der Verunreinigungen gewinnen.

2.2.2 Lokalisierung des Divertorfeldes durch Multipolkompensationsleiter

Auch ein Leitertriplett mit Nettostrom gleich null, wie es bei ASDEX zur Erzeugung einer Divertor-Feldkonfiguration vorgesehen ist, hat immer noch einen nichtlokalen Effekt auf die Form und Lage der Plasmasäule. Dieser Effekt kann durch die Einführung sogenannter Multipolkompensationsleiter (MC-Leiter), die außerhalb des Vakuumgefäßes angebracht sind und das Feld des Divertortriplets – außer in dessen unmittelbarer Nähe – zu möglichst hoher Ordnung kompensieren, weiter reduziert werden. Divertortriplett und Kompensationsleiter zusammen ergeben dann über den größten Teil des Plasmaquerschnitts nur noch ein sehr kleines Feld, so daß Feldkrümmung, Plasmaform und damit auch die Lagestabilität durch das Feld der unabhängig regelbaren Vertikalfeldspulen bestimmt sind. Letztere wurden für eine möglichst homogene Feldkrümmung von $n = d \log B_z / d \log r = -0.5$ ausgelegt.

Diese Aufspaltung der axialsymmetrischen Leiter ergibt folgende Vorteile:

- Weitgehend kreisförmige Flußflächen im Plasma, deren Form sich nur in Divertornähe von jenen unterscheidet, die sich bei ausgeschalteten Multipol- und Multipolkompensationsspulen im konventionellen TOKAMAK-Betrieb ergibt.
 - Auch ohne zeitliche Streuung von Divertor- und Multipolspulen erhält man bei Entladungsbeginn einen großen poloidalfeldfreien Bereich, der die Zündung erleichtert.
- Die Bestimmung der Lage dieser Multipolkompensations-

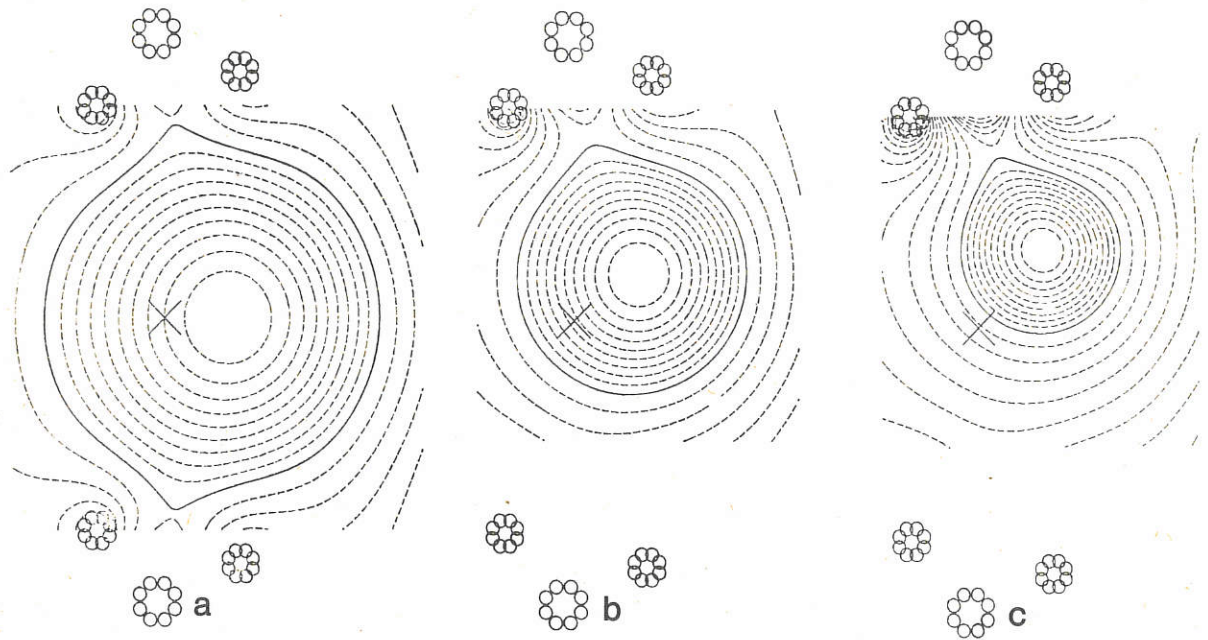


Abb. 11: Magnetischer Verschiebungslimiter. Plasmaquerschnitte für verschiedene Plasmaströme I_p .

a) $I_p = 1 \cdot I_{p0}$ b) $I_p = \frac{1}{2} \cdot I_{p0}$ c) $I_p = \frac{1}{4} \cdot I_{p0}$

und Vertikalfeldleiter ist eine nichtlineare Optimierungsaufgabe, die mit Hilfe eines dafür entwickelten numerischen Programms gelöst wurde.

2.2.3 Magnetischer Verschiebungslimiter

Es wäre wünschenswert, während der Stromaufbauphase die Querschnittsfläche des Entladungskanals und damit die Stromverteilung im Plasma regeln zu können. Eine Realisierung dieser Regelbarkeit durch Variation der Divertorströme würde jedoch außerordentlich hohe Leiterströme erfordern / 96 /. Bei dem Projekt ASDEX könnte eine derartige Steuerung der Plasmaquerschnittsfläche durch Verschiebung der Plasmasäule in Richtung auf einen der beiden Divertoren erfolgen. Abb. 11 zeigt die Plasmaquerschnitte, die sich nach diesem Vorschlag für einen Plasmastrom $I_p = 1 \cdot I_{p0}$, $\frac{1}{2} \cdot I_{p0}$ und $\frac{1}{4} \cdot I_{p0}$ ergeben würden, wenn Divertor und MC-Ströme konstant gehalten, Vertikal- und Radialfeld jedoch so gesteuert würden, daß der durch die Separatrix bestimmte Plasmaquerschnitt proportional I_p bleibt. Dieser Vorschlag erfordert keine Modifikation des technischen Konzepts, da das benötigte, sehr kleine Radialfeld ($B_{rad} < 20$ Gauss) bereits für Feedback-Zwecke vorgesehen ist.

2.2.4 Einfluß axialer Unsymmetrien auf Flußflächen

Mit Hilfe des Gourdon'schen Programms wurde der Einfluß der durch die Stromzufuhr zu den Multipolen und den Toroidal-feld-Ripple hervorgerufenen axialen Unsymmetrien auf den Feldlinienverlauf im Plasma in der Nähe der resonanten Flächen und des Staupunktes untersucht. Für die tatsächlich geplanten Lösungen zu den Multipolverbindungen und den Toroidal-feld-Ripple ergab sich dabei keine sichtbare Inselbildung um rationale q -Werte bzw. Zerstörung der magnetischen Flächen in der Separatrixnähe. Für eine später verworfene Lösung zur Multipolstromzufuhr zeigte sich jedoch eine Aufweichung der Separatrix, mit Feldlinien, die nach mehreren vollen poloidalen Umläufen in den Divertor abgelenkt werden. Dieser Effekt deutet die Möglichkeit an, die Breite der Abschältschicht durch Störspulen zu erhöhen, falls sich dies als wünschenswert erweisen sollte (Erhöhung des Screening-Effektes).

Über weitere theoretische Untersuchungen zur TOKAMAK-Stabilität bei starren Plasmabewegungen (*E. Rebhan*) und bei Plasmabewegungen, die nicht durch das Hauptfeld stabilisiert werden können (*E. Rebhan, A. Salat*), wird im Beitrag des Bereichs „Theorie“ berichtet.

Bereich Laserfusion und Wellenheizung

(Dr. Siegbert Witkowski)

Die Arbeiten in diesem Forschungsgebiet lassen sich zwei Problemkreisen zuordnen, die man durch die Schlagworte Laserfusion bzw. Wellenheizung kennzeichnen kann.

Bei der Laserfusion verfolgt man das Ziel, mit kurzen intensiven Laserlichtpulsen kleine Kügelchen aus festem Deuterium auf extrem hohe Dichten zu komprimieren und auf Fusionsstemperatur zu heizen, so daß während der durch die Trägheitskräfte bestimmten Lebensdauer des dichten Plasmas genügend viele energieliefernde Fusionsreaktionen ablaufen.

Mit der im IPP Garching vorhandenen Neodymlaseranlage (max. 50 J/5 ns) wurden die Experimente mit einem Strahl an ebenen Targets weitergeführt. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf Probleme der Absorption und Reflexion der Laserstrahlung, der Röntgenemission und Stoßwellenausbreitung sowie auf die Entwicklung und den Test von Diagnostikmethoden.

In den experimentellen Untersuchungen zur Lichtabsorption und Reflexion gelang es, zwischen klassischer Reflexion und stimulierter Rückstreuung zu unterscheiden. Bemerkenswert ist die Übereinstimmung der Experimente mit der numerischen Simulation der Licht-Plasma-Wechselwirkung. Damit bahnt sich zum ersten Male ein detailliertes Verständnis der zur Lichtreflexion führenden Vorgänge an. Die Untersuchung der gasdynamischen Vorgänge in und vor dem bestrahlten Target mit unabhängigen Diagnostikmethoden (Kurzzeitphotographie im sichtbaren Bereich und Röntgenaufnahmen) ergaben übereinstimmende Ergebnisse; sie machten insbesondere den Einfluß der Wärmeleitung auf das Verhalten des Plasmas deutlich.

Die Arbeiten an den Jodlasern, die für Laser-Plasma-Experimente vorgesehen sind, betrafen im Berichtsjahre vorwiegend die Klärung von physikalischen und chemischen Detailfragen sowie die technische Entwicklung der Komponenten für ASTERIX III. Die Druckverbreiterung der Jodlinie, die für die Optimierung der einzelnen Verstärkerstufen geeignet gewählt werden muß, wurde in einem weiteren Druckbereich mit verschiedenen Zusatzgasen untersucht. Durch die Wahl geeigneter Gasmischungen wurde die Reversibilität des Pumpvorganges erhöht. Dabei wurden Lösungen für die Verhinderung des Selbstanschwingens der Einzelverstärker und für die Entkopplung der Stufen voneinander, sowie Verbesserungen der Einzelkomponenten eingeführt. Die im Endverstärker ASTERIX III gespeicherte Energie wurde zu etwa 160 J/m gemessen und entspricht damit den erwarteten Werten.

Bei den chemischen Lasern wurde neben einigen Versuchen mit anderen Systemen vor allem noch der Fluorwasserstofflaser untersucht. Es wurde ein reaktions-

kinetisches Modell entwickelt, das den zeitlichen Verlauf der Besetzungszahlen der verschiedenen Schwingungsrotationsniveaus beim HF-Laser beschreibt. Experimentell konnte nachgewiesen werden, daß Reaktionen, die zur Bildung von HF führen, durch die HF-Laserstrahlung selbst angeregt werden. Ob damit der angestrebte HF-Wanderwellen-Verstärker hoher Leistung realisiert werden kann, werden erst weitere, noch nicht abgeschlossene Detailuntersuchungen entscheidbar machen.

Die Anregung von Plasmawellen geeigneter Frequenz und ihre Dämpfung innerhalb des Plasmas stellen eine der Möglichkeiten dar, mit denen stoßfreie, in Magnetfelder eingeschlossene Plasmen auf Fusionstemperaturen geheizt werden. Die lineare Spiegelmaschine LIWEREX dient der Untersuchung dieser Heizmechanismen und der Methoden zur effektiven Ankopplung der die Plasmawellen anregenden Hochfrequenzenergie. Erste Ergebnisse mit der 1974 in Betrieb genommenen Apparatur zeigten, daß 30 kW – UKW Leistung in der Nähe der unteren Hybridfrequenz nahezu reflexionsfrei eingekoppelt werden kann. Obwohl bei dieser ersten Meß-Serie die (magnetohydrodynamische Stabilität gewährleistenden) Joffe-Stäbe noch nicht eingebaut waren, wurde bereits eine Ionentemperatur von der Größenordnung 30 eV erreicht.

Fortschritte waren ebenfalls bei Entwicklung geeigneter Diagnostikverfahren zu verzeichnen. Die Ionentemperatur im PULSATOR wurde durch die Analyse der durch Ladungsaustausch gebildeten Neutralteilchen bestimmt. Die Kleinwinkel-Vorwärtsstreuung von CO₂-Laserlicht, bei der die Methode der Überlagerung des die Information enthaltenden Streusignals mit einem stark abgeschwächten Teil des Primärsignals (Falschlicht) angewendet wird, wurde erfolgreich an getriebenen ionenakustischen Wellen getestet.

Bei den begleitenden theoretischen Arbeiten sind Beiträge zur Frage der Einkopplung von Wellen in heiße Plasmen zu erwähnen sowie die Beschreibung von Moden, die wesentlich durch die magnetischen Terme des Maxwellschen Spannungstensors bestimmt sind und vor allem im Hoch-Beta-Bereich Bedeutung haben.

1. ERZEUGUNG DICHTER PLASMEN DURCH LASER

(R. Sigel, S. Ariga, K. Eidmann, C. von Kessel*),
P. Mulser, H. C. Pant**)

Die theoretische Untersuchung der gasdynamischen Vorgänge und der Licht-Plasma-Wechselwirkung bei laserbestrahlten Pellets, die Entwicklung von Hochleistungslasern sowie die Durchführung von Kompressionsexperimenten sind derzeit Schwerpunkte der internationalen Forschung auf dem Gebiet der Laserfusion. Wegen der begrenzten personellen Kapazität kann im IPP zumindest vorläufig ein ähnlich umfangreiches Laserfusions-Programm wie in den großen Laboratorien der USA, der Sowjetunion und in Frankreich nicht durchgeführt werden. Die experimentellen Arbeiten auf diesem Gebiet wurden im Berichtsjahre im bisherigen Umfang weitergeführt. Die numerischen gasdynamischen Rechnungen zur Implosion von Pellets sowie zur Simulation von Experimenten wurden unterbrochen, da die dafür eingesetzten Wissenschaftler für andere Projekte benötigt wurden.

*) EURATOM-Stipendiat

**) Gast vom Bhabha-Institut, Indien

Das Programm der Gruppe „Dichte Laserplasmen“ ist überwiegend experimentell orientiert und sieht als das nächste größere Ziel die Durchführung von Experimenten mit der im Aufbau befindlichen 1 kJ-Jodlaseranlage ASTERIX III vor. Entsprechend der ursprünglichen Planung wurde für diesen Zweck ein Labor eingerichtet. Aufgebaut wurden eine neue Experimentierkammer für 1-Strahl-Experimente mit ASTERIX III, geeignet zur Aufnahme der Fokussierungsoptik (20 cm Strahldurchmesser) und der vorhandenen Diagnostik. Nach dem gegen Jahresende durchgeführten erfolgreichen Test des modifizierten Kryostaten für die Erzeugung von Targets aus festem Wasserstoff ist die Experimentierkammer nunmehr betriebsbereit.

In den vergangenen Jahren wurde über eine Reihe von „Anomalitäten“ im Verhalten von lasererzeugten Plasmen berichtet, so über das Auftreten schneller Elektronen im Plasma, die kollimierte Rückstreuung von Laserlicht etc. Mit dem Anlaufen umfangreicher experimenteller Untersuchungen in verschiedenen Ländern wurden diese Experimente wiederholt – mit ähnlichem Erfolg. Angesichts der Schwierigkeit, die experimentellen Ergebnisse mit den vorhandenen

theoretischen Modellen in Einklang zu bringen, hat sich überall die Erkenntnis durchgesetzt, daß erheblich detailliertere und sorgfältigere experimentelle Untersuchungen notwendig sein werden, als ursprünglich angenommen worden war. Dies hat uns dazu bewogen, die Experimente mit der vorhandenen Neodymlaseranlage bis zur Fertigstellung des Jodlasers fortzusetzen. Neben der Untersuchung des Plasmaverhaltens, insbesondere im Hinblick auf die Lichtabsorption und Reflexion, dient diese Anlage der Entwicklung und dem Test neuer Diagnostikmethoden. Über einige ausgewählte Aspekte dieser Untersuchungen wird unten berichtet (für ausführlichere Information siehe die Veröffentlichungen / 29, 47, 70–73, 121–125, 154, 183, 187, 205 /).

Der Gruppe oblag ferner die Organisation und Durchführung der 7th European Conference on Plasma Production by High Power Lasers, die mit ca. 80 Teilnehmern aus Europa und Übersee vom 22. bis 26. April 1974 im IPP abgehalten wurde.

1.1 Rückstreuung von Laserstrahlung aus einem lasererzeugten Plasma

Fällt Laserstrahlung auf ein ebenes, inhomogenes Plasma ein, so wird ein Teil der Strahlung spiegelnd an der Schicht mit der kritischen Dichte ($\omega_{pe} = \omega_L$) reflektiert (Abb. 1a). Ist die kritische Schicht rau – z. B. durch Anregung der parametrischen Zerfallsinstabilität – so erwartet man zusätzlich einen diffusen Untergrund von Streustrahlung (Abb. 1b). Stellt sich unter dem Einfluß der Lichtwelle eine Modulation bestimmter Wellenlänge ein, so kann das Licht – ähnlich wie an einem geblazten Gitter – bevorzugt in Rückwärtsrichtung gestreut werden. Die gerichtete Rückstreuung kann durch stimulierte Anregung von Schallwellen im unterdichten Plasma (stimulierte Bragg-Streuung) verstärkt werden.

Dieses Modell der Rückstreuung wurde aus Experimenten abgeleitet; ein Beispiel dafür zeigt Abb. 2 (siehe auch / 73 /). Das Bild zeigt die Intensitätsverteilung des rückgestreuten Laserlichts in der Ebene der f/1 Fokussierungslinse. Um spiegelnde Reflexion von gerichteter Rückwärtsstreuung unterscheiden zu können, war der einfallende Laserstrahl halb abgedeckt (Symbol in der rechten oberen Ecke). Die diffuse Strahlung bei C entspricht spiegelnd reflektiertem Laserlicht (entsprechend Abb. 1a bzw. 1b);



Abb. 2: Photographie der Fokussierungslinse im Licht der rückgestreuten Laserstrahlung. Für die einfallende Laserstrahlung war die rechte Hälfte der Linse abgedeckt (siehe Symbol rechts oben). Targetmaterial: fester Wasserstoff.

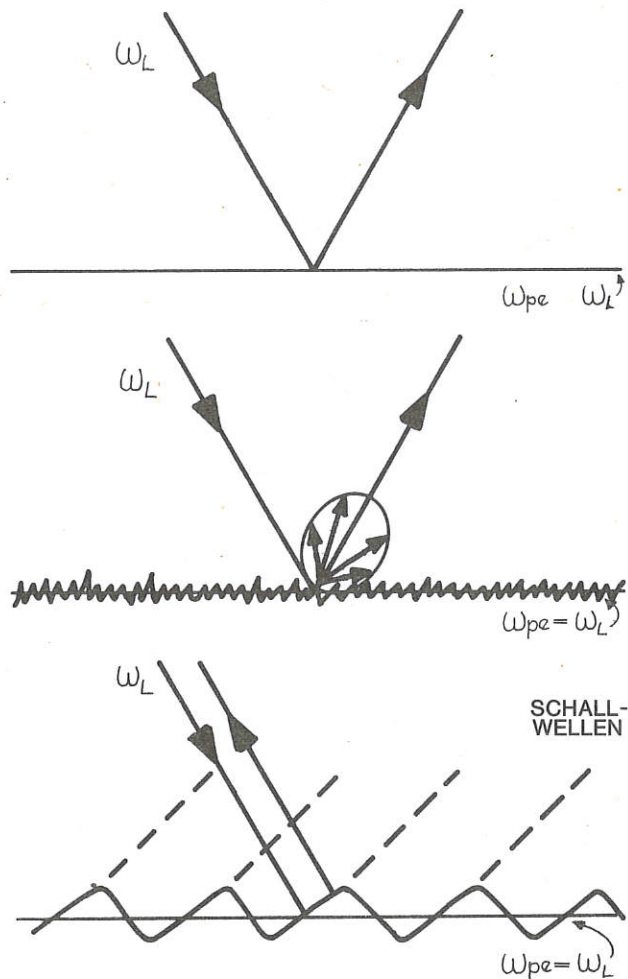


Abb. 1: Reflexion bzw. Rückstreuung von Laserstrahlung (mit der Frequenz ω_L) aus einem inhomogenen Laserplasma (symbolisiert durch die kritische Schicht $\omega_{pe} = \omega_L$).
a) Klassische (spiegelnde) Reflexion an einer ebenen Schicht.
b) Streuung an einer rauhen kritischen Schicht.
c) Gerichtete Rückstreuung an einer „geblazten“ kritischen Schicht, verstärkt durch induzierte Schallwellen im unterdichten Plasma.

die Flecken auf der linken Seite entsprechen gerichteter Rückwärtsstreuung (Abb. 1c). Solche „heißen Flecken“ sind bereits im einfallenden Licht vorhanden und kehren im rückgestreuten Licht wieder. Die spiegelnde Reflexion ist – entsprechend theoretischer Vorhersagen – von Strahlung mit der doppelten Frequenz ($2\omega_L$) begleitet¹⁾.

Das in Abb. 1 skizzierte, empirische Modell wurde inzwischen theoretisch überprüft und bestätigt²⁾. Obwohl in mancher Hinsicht sicherlich stark vereinfacht, vermittelt es zum ersten Male detaillierte Einsicht in die zur Rückstreuung führenden Vorgänge. Bemerkenswert ist, daß klassische Reflexion, stimulierte Braggstreuung und die parametrische Zerfallsinstabilität nicht mehr getrennt, sondern als verschiedene Aspekte eines einheitlichen Bildes gesehen werden.

¹⁾ K. Eidmann, R. Sigel, Phys. Rev. Lett. 34, 799 (1975)
²⁾ D. W. Forslund et al., Phys. Rev. Lett. 34, 193 (1975)

1.2 Gasdynamische Parameter des Laserplasmas

Die Untersuchung des gasdynamischen Verhaltens laserbestrahlter ebener Targets mit Hilfe der Röntgenemission und durch Kurzzeitphotographie wurde bereits im letzten Jahresbericht beschrieben. Diese Messungen wurden einer detaillierten Auswertung unterzogen / 71, 124, 125 /.

Abb. 3 zeigt als Beispiel die – durch „Entabelung“ aus Lochkameraaufnahmen – bestimmte radiale Verteilung von Elektronentemperatur T_e , Elektronendichte n_e und Elektronendruck p_e in der Nähe der Targetoberfläche. Bemerkenswert ist, daß eine Elektronendichte von $2-3 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ d. h. größer als die kritische Dichte ($1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) gemessen wird. Dieses Ergebnis wird auf die hohe Wärmeleit-

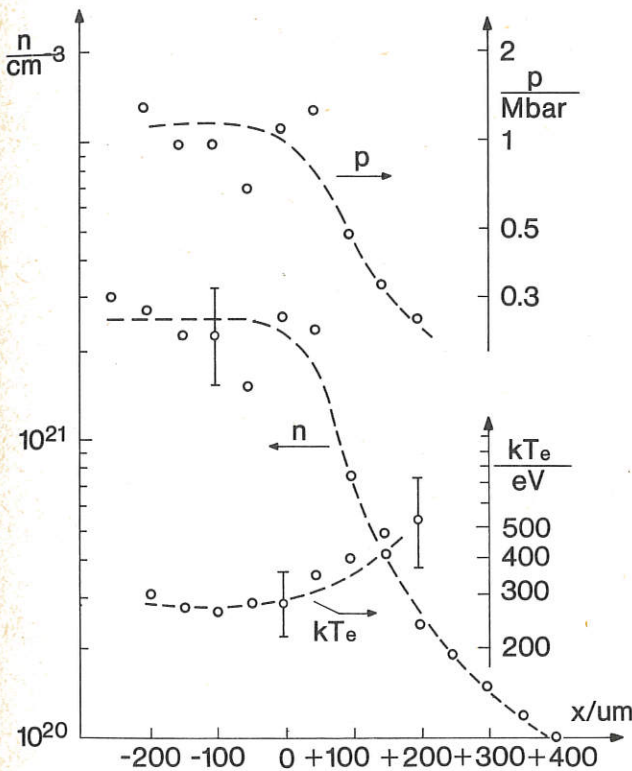


Abb. 3: Aus Lochkameraaufnahmen der weichen Röntgenstrahlung ermittelte Verteilung der Plasmaparameter (senkrecht zur Targetoberfläche).

fähigkeit des Plasmas zurückgeführt. Die unabhängig mittels Kurzzeitphotographie aus der Stoßwellengeschwindigkeit bestimmten Plasmaparameter sind in guter Übereinstimmung mit diesen Messungen.

Die Experimente wurden von numerischen Studien der Plasmaheizung und Expansion begleitet³⁾ / 47 /. Sie zeigen daß a) die Machzahl der Strömung bei der kritischen Dichte im allgemeinen von $M = 1$ abweicht, sowie daß b) die Divergenz der Strömung und die Wärmeleitung ins unterdichtete Plasma und c) seitliche Wärmeleitung die Temperatur des Plasmas im Vergleich zu idealisierten Verhältnissen (ebene Geometrie) herabsetzen. Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen ergibt sich ein befriedigendes Verständnis der gemessenen Plasmaparameter.

³⁾ E. Cojocaru, P. Mulser, Plasma Physics 17, 393 (1975)

1.3 Kurzzeitphotographie mit Pikosekunden-Laserimpulsen

Kurzzeitphotographie vermittelt ein unmittelbares Bild der Vorgänge am Target, sei es der Stoßwellenausbreitung in einem ebenen Target oder – in zukünftigen Experimenten – der zeitlichen Entwicklung der Korona eines laserbestrahlten Pellets. Die in Laser-Plasma-Experimenten erforderliche, extrem hohe räumliche und zeitliche Auflösung verlangt die Entwicklung neuer Techniken.

Anders als bei der früher beschriebenen Methode (siehe Jahresbericht 1973), bei der zur Bildtrennung eine Schmierkamera eingesetzt war, wurden nunmehr Einzelaufnahmen laserbestrahlter Targets mit erheblich verbesserter räumlicher Auflösung ($\leq 10 \mu\text{m}$) direkt auf Film aufgenommen.

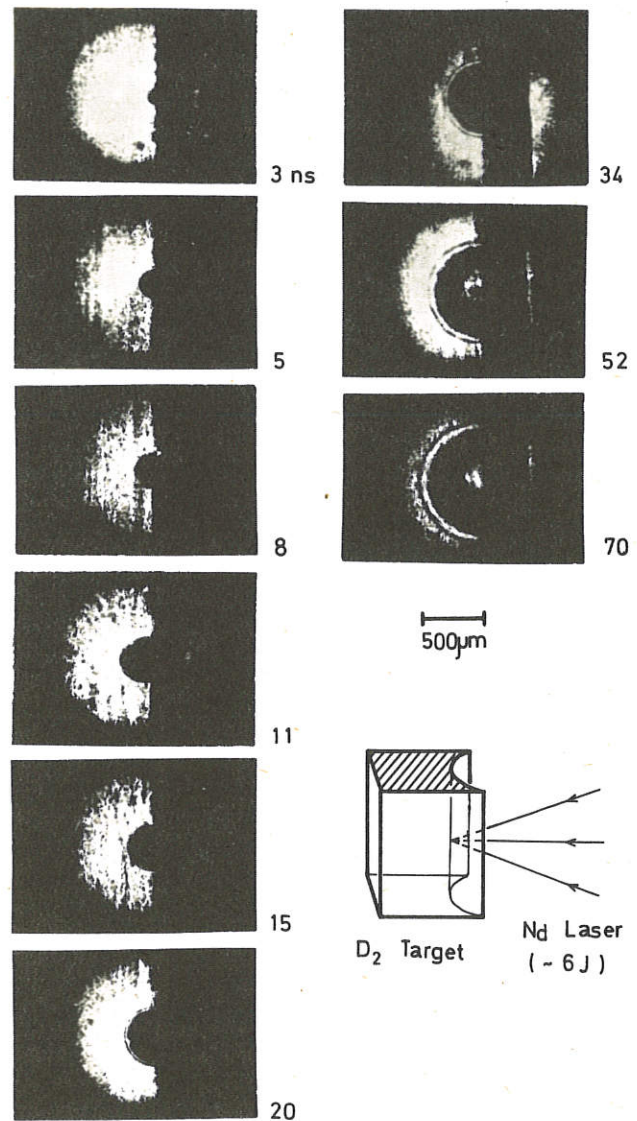


Abb. 4: Kurzzeitphotographie: Zeitliche und räumliche Entwicklung der Stoßwelle und des Kraters in einem festen Wasserstofftarget während und nach der Laserbestrahlung. Einstrahlung durch den plasmaerzeugenden Neodymlaser erfolgt von rechts (Pulsdauer 5 ns).

Als Hintergrundbeleuchtung diente ein einzelner ~ 5 ps-Lichtimpuls, der durch einen vom plasmaerzeugenden Neodymlaser getriggerten optischen Schalter aus dem Impulszug eines modengekoppelten Dylasers herausgeschnitten wurde. Abb. 4 zeigt als Beispiel die zeitliche Entwicklung der Stoßwelle und des Kraters in einem laserbestrahlten Target aus festem Wasserstoff. Man beachte die gute räumliche und zeitliche Auflösung des Vorgangs. In Zusammenarbeit mit dem Projekt Laser-Plasma-Quelle wurde mit dieser Methode das Verhalten laserbestrahlter Pellets untersucht (siehe den entsprechenden Abschnitt dieses Jahresberichts).

2. PHOTOCHEMISCHER JODLASER

(G. Brederlow, E. Fill, W. Fuß, K. Hohla, R. Volk, K. J. Witte)

Die am Jodlaser durchgeführten Arbeiten haben das Ziel, einen gepulsten Hochleistungslaser für Fusionsexperimente zu bauen und die physikalischen Grundlagen für die Optimierung des Lasers zu untersuchen.

Die Beschreibung der Wirkungsweise dieses photochemischen Dissoziationslasers (LasermEDIUM: gasförmiges C_3F_7J) und das Aufbauschema der bereits vorhandenen bzw. sich im Aufbau befindlichen gepulsten Jodlaser ASTERIX II und ASTERIX III (geplante Ausgangsenergie: im Bereich um 100 bzw. 1000 J in 1 ns Pulsen) sind im Jahresbericht 1973 (S. 101–105) angegeben.

Während mit ASTERIX II physikalische Grundlagen und technische Erfahrungen für den Aufbau von ASTERIX III erarbeitet wurden, sind am ASTERIX III die Untersuchungen des Endverstärkers durchgeführt und der Aufbau des Systems nahezu abgeschlossen worden.

Weiterhin wurde spektroskopisch die Hyperfeinstruktur des Laserübergangs ermittelt, um zunächst festzustellen, welche Hyperfeinstrukturlinien im Jodlaser auftreten, und um gegebenenfalls die Bedingungen zu finden, unter denen gleichzeitig alle Hyperfeinstrukturlinien erscheinen. Diese Untersuchungen haben das Ziel, eine maximale Energieextraktion aus dem Lasersystem sicherzustellen. Außerdem wurde die Druckverbreiterung durch Fremdgaszusatz untersucht, um für das LasermEDIUM die Parameterwerte zu bestimmen, die eine optimale Energieausbeute des Lasers gewährleisten.

Ferner wurde mit der Entwicklung von Methoden zur optischen Isolation der einzelnen Verstärkerstufen voneinander begonnen, um eine möglichst hohe Gesamtverstärkung im Lasersystem zu erreichen.

2.1 ASTERIX II

An der Laseranlage ASTERIX II wurden die für den Bau und den Betrieb von gepulsten Hochleistungs-Jod-Lasern wichtigen physikalischen und technischen Problemkreise untersucht.

Diese Laseranlage ist im Berichtsjahr um eine Verstärkerstufe erweitert worden, so daß sie jetzt aus einem modengekoppelten Oszillator, einem Pulsschneidesystem und drei Verstärkerstufen besteht. Um die Energie der Oszillatorpulse zu erhöhen, wurde der Oszillator im „gain-switch“ bei Selbstmodenkopplung untersucht. Es gelang bei starker Energieauskopplung (*transmission mode*), sehr energiereiche Oszillatorpulse (ca. 20 mJ) von mehreren ns Dauer zu

erzeugen. Jedoch konnte dieses Konzept nicht für den regulären Laserbetrieb angewendet werden, da Pulsenergie und -Dauer zu stark streuten. Um die Ausbeute des Lasers zu erhöhen und die Strahlqualität zu verbessern, sind umfangreiche Untersuchungen des 2. Verstärkers durchgeführt worden. So wurden, um ein optimales Pumpen des LasermEDIUMS zu erzielen, verschiedene Blitzlampen- und Reflektorkonfigurationen getestet. Optimale Energieausbeute und eine homogene Ausleuchtung des Laserrohres wurde erreicht, indem zwei Blitzlampenpaare entlang des Laserrohres so angebracht waren, daß die durch ein Paar bestimmte Verbindungsebene um 90° gegeneinander gedreht war. Die dazugehörigen Reflektoren umschlossen dabei möglichst eng die Blitzlampen und das Laserrohr. Die Homogenität der Ausleuchtung des LasermEDIUMS konnte noch zusätzlich dadurch verbessert werden, daß die Innenwand des Laserrohres aufgeraut wurde.

Um die Belastbarkeitsgrenze der optischen Komponenten nicht zu überschreiten, ist von Verstärkerstufe zu Verstärkerstufe eine Vergrößerung des Strahlquerschnittes erforderlich. Zunächst wurden für die Strahlaufweitung Linsen- bzw. Spiegelsysteme verwendet. Schließlich erfolgte jedoch die Strahlaufweitung aufgrund der natürlichen Strahldivergenz bei entsprechendem Abstand der einzelnen Verstärkerstufen. Diese Methode hatte den Vorteil, daß die Justierarbeiten verringert wurden und eine stärkere Entkopplung der einzelnen Verstärkerstufen erreicht wurde. Messungen der Strahldivergenz ergaben, daß ihr Wert $1 \pm 0,2$ mrad betrug.

Da das LasermEDIUM bisher nur einmalig verwendet werden konnte, wurde mit der Entwicklung eines Verfahrens begonnen, das eine Regeneration ermöglicht. Mit Hilfe dieses Verfahrens sollen die Photolyseprodukte, die eine Desaktivierung der angeregten Jodatome bewirken, entfernt und das verbrauchte LasermATERIAL kontinuierlich ersetzt werden.

Messungen der Laserpulsverstärkung, die mit der ersten und zweiten Verstärkerstufe durchgeführt wurden, ergaben, daß bei einer Gesamtverstärkung von 10^5 eine Ausgangsenergie um 3 J erreicht werden konnte. In den Verstärkern trat eine Aufsteilung der Pulsfront und eine Pulsverkürzung auf. (Abb. 5). Da eine Beeinträchtigung der optischen Strahlqualität durch Selbstfokussierung im LasermEDIUM nicht

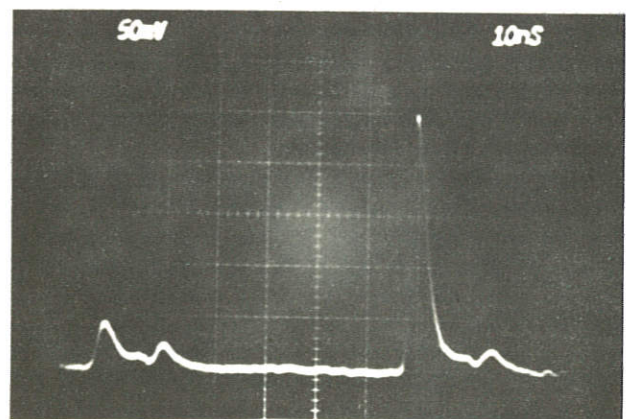


Abb. 5: Aufsteilung der Pulsfront im Verstärker. Links: Oszillatorpulse. Rechts: Verstärkte Pulse.

auszuschließen war, wurde auch diese Frage untersucht. Die bis in den Energiedichtebereich von 2 J/cm^2 durchgeführten Messungen ergaben keinen Hinweis auf Selbstfokussierung.

2.2 ASTERIX III

Dieser für Fusionsexperimente vorgesehene Laser soll einen Puls im Bereich von 1 kJ/1 ns liefern. Die Anlage besteht aus einem Oszillator, einem Pulsschneidesystem und drei Verstärkerstufen. Im Berichtsjahre wurden der Oszillator und das Pulsschneidesystem in Betrieb genommen und auf die Erfordernisse des Lasers bezüglich der geforderten Pulsdaten, der Zuverlässigkeit und der Reproduzierbarkeit eingestellt. Weiterhin wurden der erste und zweite Verstärker mit den dazugehörigen Kondensatorbatterien erweitert und modifiziert.

Umfangreiche Messungen wurden an der dritten Verstärkerstufe durchgeführt. Diese Stufe ist das Kernstück des Lasers; in ihr erfolgt die eigentliche Energieverstärkung; sie besteht aus acht Sektionen, die je eine aktive Länge von 1 m und einen Durchmesser von 20 cm haben. In zwei Sektionen dieses Verstärkers wurde die gespeicherte Energie, die Inversionsverteilung über den Querschnitt als Funktion des $\text{C}_3\text{F}_7\text{J}$ -Druckes, die Kleinsignalverstärkung als Funktion des Fremdgasdruckes und die Kopplung der einzelnen Sektionen (Längsanschwingen) gemessen.

Die Messung der im Verstärker enthaltenen Energie ergab in guter Übereinstimmung mit den Berechnungen, daß in acht Sektionen etwa 1300 J gespeichert wurden. Dieses Ergebnis gewährleistet, daß eine Verstärkung des Eingangspulses auf eine Energie im kJ -Bereich möglich sein wird.

Die Inversionsverteilung über den Querschnitt wurde bei $\text{C}_3\text{F}_7\text{J}$ -Drücken von $4, 6, 8$ und 12 Torr gemessen. In Abb. 6

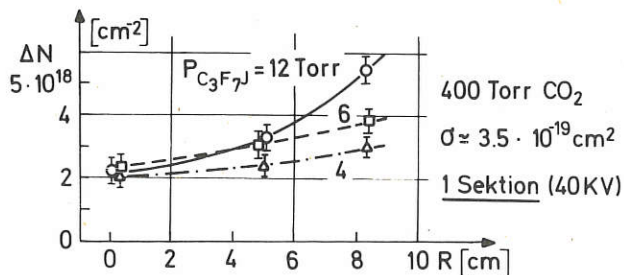


Abb. 6: Inversionsverlauf über dem Querschnitt des Endverstärkers (nach $30 \mu\text{s}$.)

ist der Inversionsverlauf über den Querschnitt bei verschiedenen $\text{C}_3\text{F}_7\text{J}$ -Drücken dargestellt. Aus den Meßergebnissen folgt, daß der Endverstärker bei einem $\text{C}_3\text{F}_7\text{J}$ -Druck von etwa 4 Torr betrieben werden muß, damit ein genügend homogener Inversionsverlauf über den Querschnitt erzielt wird. Um die berechnete Ausgangsenergie ($\sim 1 \text{ kJ}$) zu erhalten, muß die Kleinsignalverstärkung im Endverstärker etwa 10^5 betragen. Die Messungen ergaben, daß diese Verstärkung bei einem Fremdgaszusatz von 350 Torr CO_2 erreicht wird. Es ist jedoch nur dann möglich, diese Verstärkung zu halten, wenn die Kopplung zwischen den einzelnen Sektionen gering ist, so daß die Inversion nicht durch pa-

rasitäre Oszillationen abgebaut werden kann. Bei der Untersuchung des Kopplungsverhaltens der Sektionen wurde zunächst eine starke Kopplung gefunden, obgleich der „optische Sumpf“, der die Kopplung so weitgehend wie möglich unterdrücken soll, aus Materialien hergestellt war, die eine gute Absorption bzw. diffuse Reflexion des Laserlichtes zeigten. Als Ursache für dieses unerwartete Verhalten wurde eine stark reflektierende Schicht auf den Oberflächen des optischen Sumpfes festgestellt, die sich in der $\text{C}_3\text{F}_7\text{J}$ -Atmosphäre des Verstärkers ausbildet. Es konnten jedoch Materialien gefunden werden, bei denen sich diese reflektierende Schicht nur sehr schwach entwickelt; sie ermöglichten es, die Kopplung zwischen den Sektionen so weit herabzusetzen, daß die notwendige Kleinsignalverstärkung mit acht Sektionen erhalten werden konnte. Der technische Aufbau der Laseranlage wurde im Berichtsjahre nahezu abgeschlossen.

2.3 Spektroskopische Untersuchungen

Diese Untersuchungen haben das Ziel, die spektrale Zusammensetzung der Laserstrahlung zu ermitteln und gegebenenfalls die Bedingungen zu finden, unter denen möglichst alle Hyperfeinstrukturlinien des Laserüberganges emittiert und verstärkt werden können. Eine weitere Aufgabe ist, die untere Grenze für die Pulsdauer zu bestimmen. Die Hyperfeinstruktur des Laserüberganges ist in Abb. 7 dargestellt. Es zeigte sich, daß die Grundzustandsniveaus

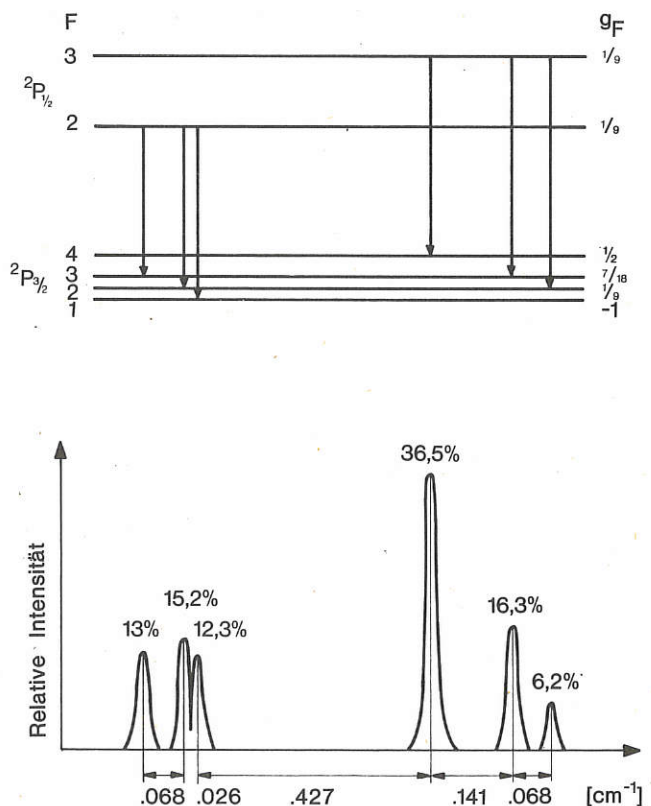


Abb. 7: Grundzustand $^2P_{3/2}$ und erster angeregter Zustand $^2P_{1/2}$ des Jodatoms mit Hyperfeinaufspaltung (Kernspin $I=5/2$, F =Gesamtdrehimpuls, G_F =spektroskopischer G-Faktor). Darunter skizziert zugeordnetes Fluoreszenzspektrum.

bereits bei Gasdrücken im Bereich von 100 Torr bzw. bei Magnetfeldstärken von wenigen 100 Oe deutlich beeinflusst wurden. Dagegen ist die Verbreiterung der Niveaus der angeregten Zustände weniger stark ausgeprägt. Durch Gasdruck oder durch Magnetfelder kann infolgedessen der Wirkungsquerschnitt für stimulierte Emission in weiten Bereichen geändert werden.

Die spektroskopischen Untersuchungen der Laserstrahlung werden zeitaufgelöst mit Hilfe eines Fabry-Perrot-Interferometers durchgeführt. Da die spektrale Empfindlichkeit der Detektoren (Photoplatte, Bildwandlerkamera) nicht ausreichte, um eine Identifikation der Linien durchzuführen, bzw. um eine genügend hohe Zeitauflösung zu erreichen, wurde durch Frequenzverdopplung mittels eines nicht-linearen Kristalls die Laserstrahlung zum Teil in den sichtbaren Bereich transformiert.

Zunächst wurden Messungen an ASTERIX II durchgeführt. Sie ergaben, daß der Oszillator nur eine Linie des Hyperfeinstrukturspektrums emittiert. Diese Linie wird dann in den Verstärkerstufen weiter verstärkt. Es konnten aber die Bedingungen ermittelt werden, unter denen bei entsprechender Wahl des Gasdrucks und der Magnetfeldstärke mehrere Hyperfeinstrukturlinien gleichzeitig emittiert werden können.

Bei stark transversalen Magnetfeldern ($H \geq 500$ Oe), emittiert der Jodlaser eine vollständig linear polarisierte Strahlung. Derartige Magnetfelder können im Laserrohr durch die Blitzlampenströme verursacht werden.

2.4 Untersuchung der Druckverbreiterung des Laser-Überganges

Die in einem Laserverstärker speicherbare Energie ist umgekehrt proportional zum Wirkungsquerschnitt für stimulierte Emission σ . Die extrahierte Energie ist dagegen, solange der Sättigungsbereich nicht erreicht ist, proportional zur Kleinsignalverstärkung und damit auch proportional zu $\exp. \sigma$. Um eine optimale Energieausbeute zu erhalten, muß deshalb der optimale σ -Wert für die einzelnen Verstärker berechnet und im Verstärker eingestellt werden. Bei dem Jodlaser mit reinem C_3F_7J als Lasermedium hat σ im allgemeinen zu große Werte. Sie können aber herabgesetzt werden, wenn der Laserübergang verbreitert wird, z. B. durch Druckverbreiterung bei Fremdgaszusätzen. Diese Zusätze können jedoch zu einer Desaktivierung der angeregten Jodatome führen. Aufgabe der hier beschriebenen Untersuchungen war es deshalb, nach Fremdgaszusätzen zu suchen, die eine optimale Verbreiterung bei vernachlässigbarer Desaktivierung bewirken. Außerdem war auch die Abhängigkeit der σ -Werte von den jeweiligen Fremdgaszusätzen zu ermitteln.

Mit den entsprechenden Untersuchungen wurde bereits 1973 begonnen. Zunächst wurden die Messungen jedoch in einem Fremdgasdruckbereich durchgeführt, der noch eine zu geringe Druckverbreiterung ergab. In diesem Druckbereich wurde der erwartete lineare Zusammenhang zwischen $1/\sigma$ und p bestätigt. Bei höherem Druck sollten nun wegen der zunehmenden Überlappung der Hyperfeinstrukturlinien des Laserüberganges mit wachsendem Druck Abweichungen von der linearen Abhängigkeit auftreten, und zwar sollte hier $1/\sigma$ weniger stark anwachsen. Die Messungen ergaben jedoch bei allen untersuchten Gasen (Ar, CO_2 ,

C_3F_7J) wiederum einen linearen Zusammenhang. Um Angaben über dieses unerwartete Verhalten machen zu können, bedarf es noch näherer Untersuchungen.

Die Überlappung der Hyperfeinstrukturlinien bei hohem Druck (z. B. $P_{CO_2} + C_3F_7J \approx 700$ Torr) verbessert nun die Homogenität des Spektrums, d. h. es kann ein größerer Teil der gespeicherten Inversion ausgenutzt werden: in unserem Falle bis zu $2/3$ der gespeicherten Energie bei Sättigung mit nur einer Frequenz. Bei niedrigerem Druck (z. B. $P_{CO_2} + C_3F_7J \approx 50$ Torr) kann dagegen nur bis zu $1/3$ der gespeicherten Energie abgerufen werden.

2.5 Optische Isolation von Verstärkerstufen

Die gesamte Kleinsignalverstärkung einer Kette von hintereinandergeschalteten Verstärkern ergibt sich aus dem Produkt der Einzelverstärkungen. Die Gesamtverstärkung nimmt sehr hohe Werte an, was zum Anschwingen der Verstärkerkette und damit zu Inversionsverlust sowie Vorheizen des Targets führen kann. Um die Verstärker voll ausfahren zu können, ohne daß die Verstärkerkette anschwingt, müssen die einzelnen Verstärker möglichst gut voneinander entkoppelt (optisch isoliert) werden.

Im Berichtsjahre wurden Untersuchungen mit zwei verschiedenen Entkopplungsmethoden begonnen. Zunächst wurden Extinktions- und Transmissionsmessungen an einem Faraday-Dreher durchgeführt. Die gemessene Extinktion war hier 2×10^{-4} , so daß eine gute Entkopplung gewährleistet ist, jedoch betrug die Transmission nur 40%. Dieser Wert müßte noch durch Verbesserung der Polarisatoren erhöht werden. Bei den Drehspiegeluntersuchungen konnte gezeigt werden, daß durch einen Drehspiegel ohne größeren Aufwand Pulse im Nanosekundenbereich sowie „optische Tore“ mit Anstiegszeiten im Nanosekundenbereich erzeugt werden können. Mit zwei verschiedenen Drehspiegeln wurden folgende Werte erreicht: Drehspiegel mit ca. 1 Zoll Durchmesser, 60 000/min; Anstiegszeit 5 ns. Drehspiegel mit 15 cm Durchmesser, 6000/min; Anstiegszeit 50 ns.

3. CHEMISCHE LASER

(K. L. K o m p a, F. Brunner, W. Fuß, G. C. Pimentel*, D. Proch, H. Pummer, U. Schmailzl, W. Schmid)

3.1 HF-Laser-Modellrechnungen

Das kinetische Modell des gepulsten Fluorwasserstofflasers wurde zum Abschluß gebracht. Wie im Jahresbericht 1973 geschildert, wurden zwei verschiedene Anfangsverteilungen getestet; die eine folgt dem von Ben-Shaul, Levine, et al. entwickelten statistischen Ansatz, die andere stammt aus Polanyi's Chemolumineszenzmessungen. In die Rotengleichungen der einzelnen Rotationsschwingungsniveaus wurden detaillierte J-abhängige Relaxationsterme einbezogen. Insbesondere für den $V \rightarrow R$, T-Austausch ($V =$ Vibrations-, $R =$ Rotations-, $T =$ Translations-Energie) zwischen Fluorwasserstoffmolekülen mußten die einzelnen J-abhängigen Konstanten erst mit Hilfe theoretischer Überlegungen und anhand experimenteller Anhaltspunkte abgeschätzt werden.

Die umfangreichen numerischen Rechnungen liefern integrierte Laserintensitäten einzelner Übergänge. Wie die abgebildeten Computerplots zeigen, ist die Intensitätsverteilung

*) Gast von der University of California, Berkeley (USA)

Intensitätsverteilung mit und ohne Relaxation (integriert über 40 μsec)

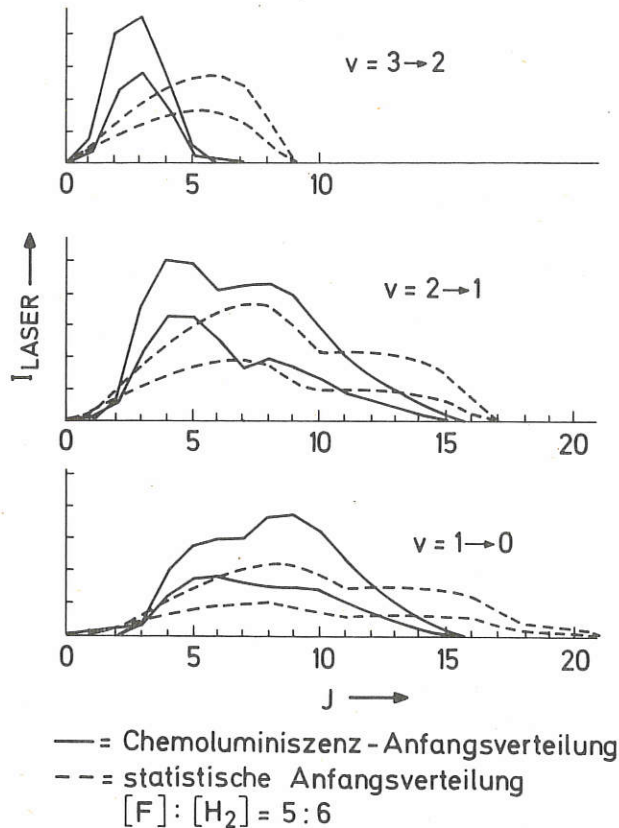


Abb. 8: HF-Laser-Übergänge: Rotationsverteilung und berechnete Intensitäten (relative Einheiten)

lung unabhängig von Relaxationsprozessen weitgehend durch die angenommene Anfangsverteilung bestimmt. Die gegenläufigen Relaxationsprozesse $R \rightarrow R$, T und $V \rightarrow R$, T kompensieren sich in ihrer Wirkung.

Ein Vergleich mit dem im HF-Laser von Pummer *et al.* beobachteten höchsten Linien ($P(9)_{3-2}$, $P(16)_{2-1}$, $P(17)_{1-0}$) sowie mit Literaturdaten zeigten im Vergleich mit den berechneten Intensitäten, daß das einfache statistische Modell die beste Beschreibung der Verhältnisse im PulsLasersystem liefert.

3.2 Laser-induzierte HF-Laser

Die Arbeiten zur Initiierung der HF-Bildungsreaktion durch HF-Laserpulse wurden fortgesetzt. Es wurde sichergestellt, daß HF-Kettenreaktionen in $\text{N}_2\text{O}/\text{XeF}_4/\text{H}_2$ -Gemischen initiiert werden können. Wegen der chemischen Komplexität dieser Reaktionsmischungen wurde jedoch zunächst die Reaktionsinitiierung unter Vermittlung von HF (anstelle von N_2O) untersucht. Dabei trat eine unerwartet hohe Absorption der eingestrahlten Laserpulse auf – insbesondere der höheren Schwingungsübergänge des eingestrahlten Laserpulses. Die Absorption zeigt darüber hinaus charakteristische Sättigungsphänomene im Bereich eingestrahlter Leistungen von 1–20 MW/cm^2 und bei HF-Drücken von 1

bis 100 Torr. Der Mechanismus dieser Aufheizung von HF-Gas wird zur Zeit nicht voll verstanden. Die Untersuchungen werden fortgeführt unter Zuhilfenahme des im Jahresbericht 1973 bereits kurz beschriebenen HF-cw-Lasers für die Diagnostik der Absorption einzelner Laser-Linien. Dazu wurden erste Modellvorstellungen über eine Umverteilung der absorbierten Energie, die primär nur in den Übergängen vom HF-Grundzustand aufgenommen wird, entwickelt. Es wird erwartet, daß dieses Experiment verallgemeinerungsfähige Aufschlüsse über die Besetzbarkeit höherer Schwingungszustände bei laser-induzierten chemischen Prozessen gibt. Die Arbeiten sollen bis Ende 1975 zum Abschluß gebracht werden.

3.3 Neu aufgenommene Experimente

Im letzten Quartal 1974 wurde mit dem Aufbau eines neuen Arbeitsprogramms begonnen, dessen Ziele in der gezielten Initiierung chemischer Reaktionen durch Laserstrahlung liegen. Im Hinblick auf diese Zielsetzung wurde mit dem Aufbau von zwei Experimenten begonnen, deren eines die Untersuchung von Moleküldissoziationen unter stoßfreien Bedingungen (im Molekularstrahl) zum Gegenstand hat, während das andere mit ähnlicher Zielsetzung Stöße mit einbezieht. Für diese Experimente wurde daneben mit dem Bau und der Entwicklung geeigneter Laser begonnen. Zur Zeit stehen ein CO_2 - und N_2O -Pulsaser zur Verfügung, an dessen Abstimmbarkeit gearbeitet wird. Weiterhin wurde mit dem Aufbau eines elektronenstrahl-gepumpten molekularen Xenon-Lasers begonnen. Der Aufbau und Test dieser Experimente soll bis Herbst 1975 abgeschlossen sein. Über Details des Aufbaus kann erst im Zusammenhang mit ersten Ergebnissen berichtet werden.

Es wurden ferner Versuche an möglichen neuen chemischen Lasersystemen begonnen; sie umfassen die Untersuchung spontaner Emission bei der Oxydation von Metaldämpfen (Wolfram, Barium), die Erzeugung elektronisch angeregter Jodatome auf chemischem Wege („chemischer Jodlaser“) und die Eliminierung von Fluorwasserstoff aus bestimmten organischen Verbindungen. Ergebnisse lagen bis Ende 1974 noch nicht vor.

4. WELLEN IM PLASMA

(H. Derfler, D. R. Baker, O. Gehre, N. R. Heckenberg, F. Leuterer, H. M. Mayer, J. Meyer^{*)}, S. Puri, M. Tutter, C. B. Wharton^{**})

Ziel der Arbeiten der Wellengruppe ist es, das Dispersions- und Relaxationsverhalten von Plasmawellen zu studieren, zum Zwecke der späteren Hochfrequenzheizung von Plasmen auf thermonukleare Temperaturen. Die dabei entwickelte Diagnostik soll zur Steuerung der Heizprozesse in künftigen Fusionsmaschinen beitragen.

4.1.1

a) Kopplung und Absorption von Unterhybridwellen in thermonuklearen Plasmen

Die drei wichtigen Punkte Erreichbarkeit, Anpassung und Absorption werden unter idealisierten, aber im wesentlichen zutreffenden physikalischen Bedingungen mittels line-

^{*)} Gast von der University of British Columbia, Canada

^{**} Gast von der Cornell University (USA)

arer Theorie behandelt. Es stellt sich dabei heraus, daß zwei lineare Modenkonzersionen stattfinden – erst in die Plasmawelle und dann in die elektrostatische Welle – und daß die Energie der Unterhybridwelle bei Vorhandensein eines Gradienten des äußeren Magnetfeldes schließlich den Plasmaionen mitgeteilt wird.

Oberflächenimpedanzen des Plasmas wurden errechnet im Hinblick sowohl auf Einkopplung mit Verzögerungsleitung als auch durch Einstrahlung mit streifendem Einfall. Dabei wurden die Parameter der Maschinen: WEGA, ATC, W VII, ASDEX, FT, PLT und PPPL herangezogen.

Es scheint, daß *Buchsbaums* Zweiionenhybridresonanz die beste Heizmethode für große thermonukleare Plasmen und auch für Plasmen kleinerer Maschinen wie WEGA, ATC und W VIIa ist.

b) Anregung elektromagnetischer Wellen in plasmagefüllten Hohlleitern mit Spalten oder Verzögerungsleitungen

Betrachtet wurde ein zylindrischer Hohlleiter, gefüllt mit einem kalten, inhomogenen Plasma. In diesem System werden die *Maxwell*-Gleichungen bei vorgegebenen Randbedingungen (Anregung durch einen einzelnen Spalt bzw. durch eine *Millman*-Verzögerungsleitung) gelöst. Die Felder, der Leistungsfluß und die Eingangsadmittanz an der Einspeisung lassen sich als Summen über radiale Eigenmoden darstellen, die entsprechend ihrer Anregungsstärken und dem Spektrum $g(k)$ der externen Anregung gewichtet werden. Für eine ausführliche Darstellung der theoretischen Grundlagen siehe / 50, 60 /. Für eine Anregung durch einen Spalt der Breite d ergeben sich die Felder:

$$\begin{pmatrix} E_z \\ H_z \\ E_\varphi \\ H_\varphi \end{pmatrix} = y_\alpha(\omega, z, r) = U_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_\alpha(\omega, k_n, r)}{k_n d} \begin{cases} e^{-ik_n(z+d/2)} - e^{-ik_n(z-d/2)} & , z > d/2 \\ e^{+ik_n(z-d/2)} - e^{+ik_n(z+d/2)} & , z < -d/2 \\ -2 + e^{-ik_n(z+d/2)} + e^{+ik_n(z-d/2)} & , |z| < d/2 \end{cases}$$

wobei k_n die Wellenzahlen der radialen Eigenmoden und $F_\alpha(k_n, r)$ ihre Eigenfunktionen sind. Die nach dieser Gleichung berechneten Felder und der Leistungsfluß im Hohlleiter zeigen folgende Eigenheiten (gültig für $\omega_{LH}(0) < \omega < \omega_p(0), \omega_c$).

Durch Interferenz der radialen Moden wird an einem bestimmten Radius $r(\omega, z)$ der Poyntingvektor maximal. Abb. 9 zeigt, wie sich der Betrag des Realteils vom Poyntingvektor durch Aufsummierung immer weiterer Moden entwickelt und der Leistungsfluß dadurch räumlich begrenzt wird. Die Bahn des Leistungsflusses $r(z)$ ist als „Resonance Cone“ bekannt und wird in Abb. 10 für verschiedene Dichteprofile gezeigt. Wie weit die höheren Moden zum axialen Leistungsfluß beitragen, ist aus Abb. 11 ersichtlich. Bei unendlich dünnem Spalt ($D = 0$) tritt in den Fällen a und b noch keine Sättigung auf, obwohl der Beitrag der höheren Moden immer geringer wird. Erst bei endlicher Spaltbreite $D > 0$ tritt wegen der immer schwächer werdenden externen Anregung der höheren Moden eine Sättigung auf. Beim inhomogenen Plasma (b und c) nehmen zusätzlich auch die Anregungsstärken der höheren Moden ab, insbesondere wenn eine Schicht $\omega = \omega_p(r)$ existiert wie im Falle c, so daß eine Sättigung schon nach Aufsummierung weniger radialer Moden erreicht wird. In solch einem Fall kann sich der „Resonance Cone“ nicht mehr richtig ausbilden und wird verwaschen.

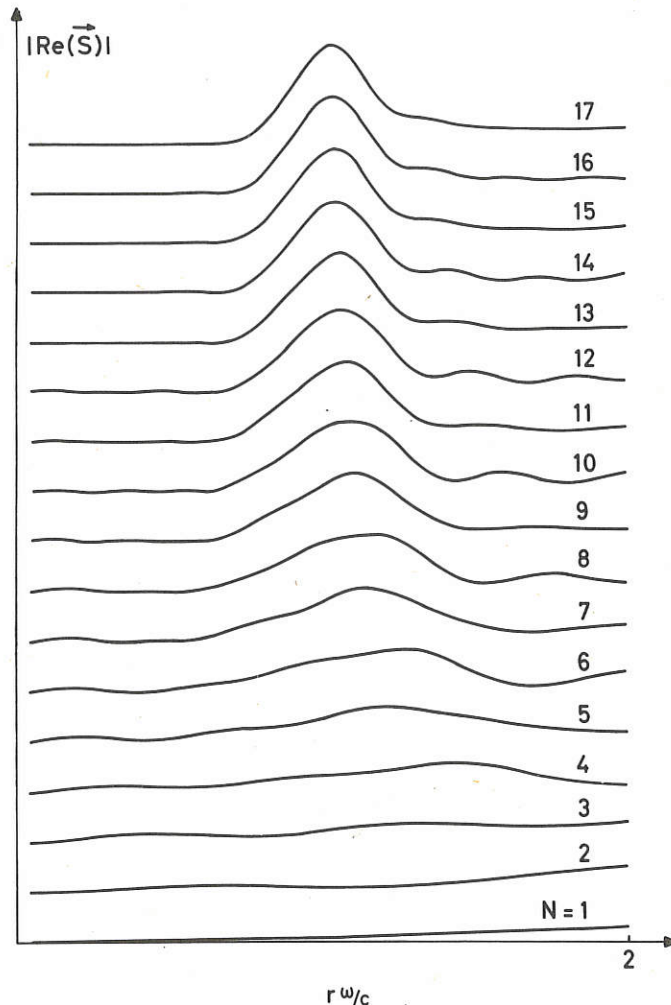


Abb. 9: Entwicklung des Resonance Cones durch Aufsummierung radialer Moden.

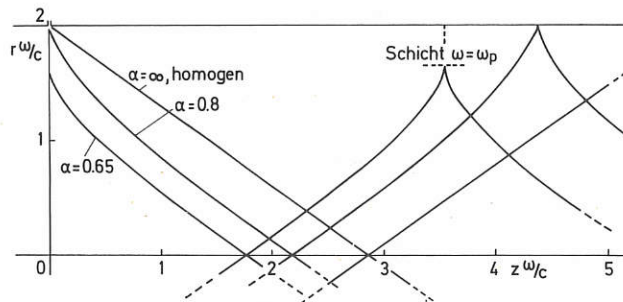


Abb. 10: Resonance Cones im plasmagefüllten Hohlleiter mit verschiedenen Dichteprofilen. (Plasmaparameter wie in Abb. 1).

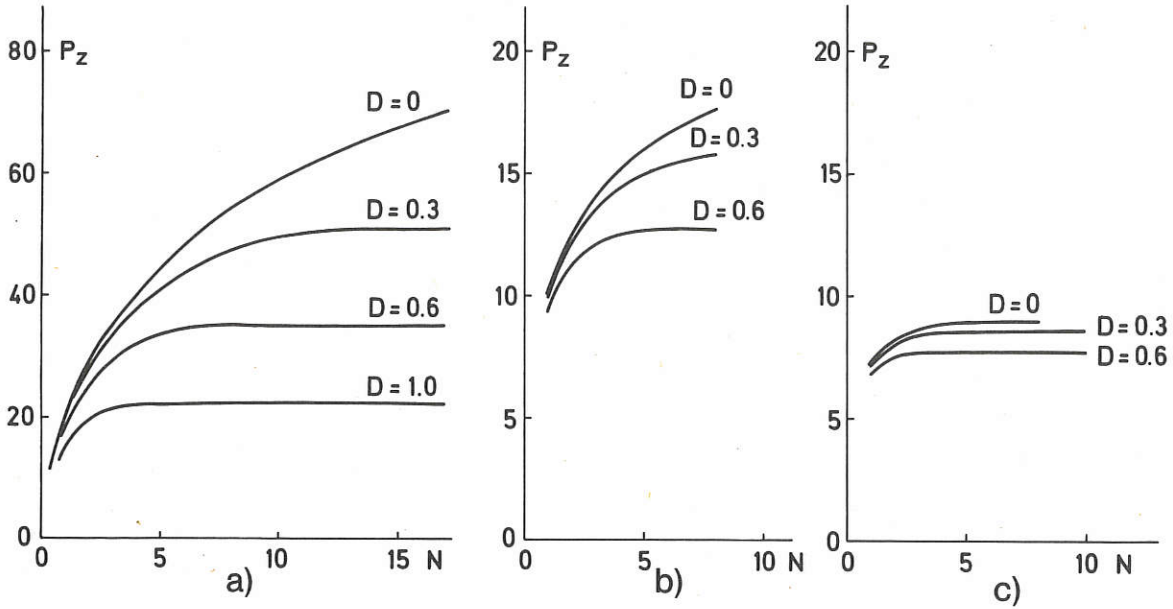
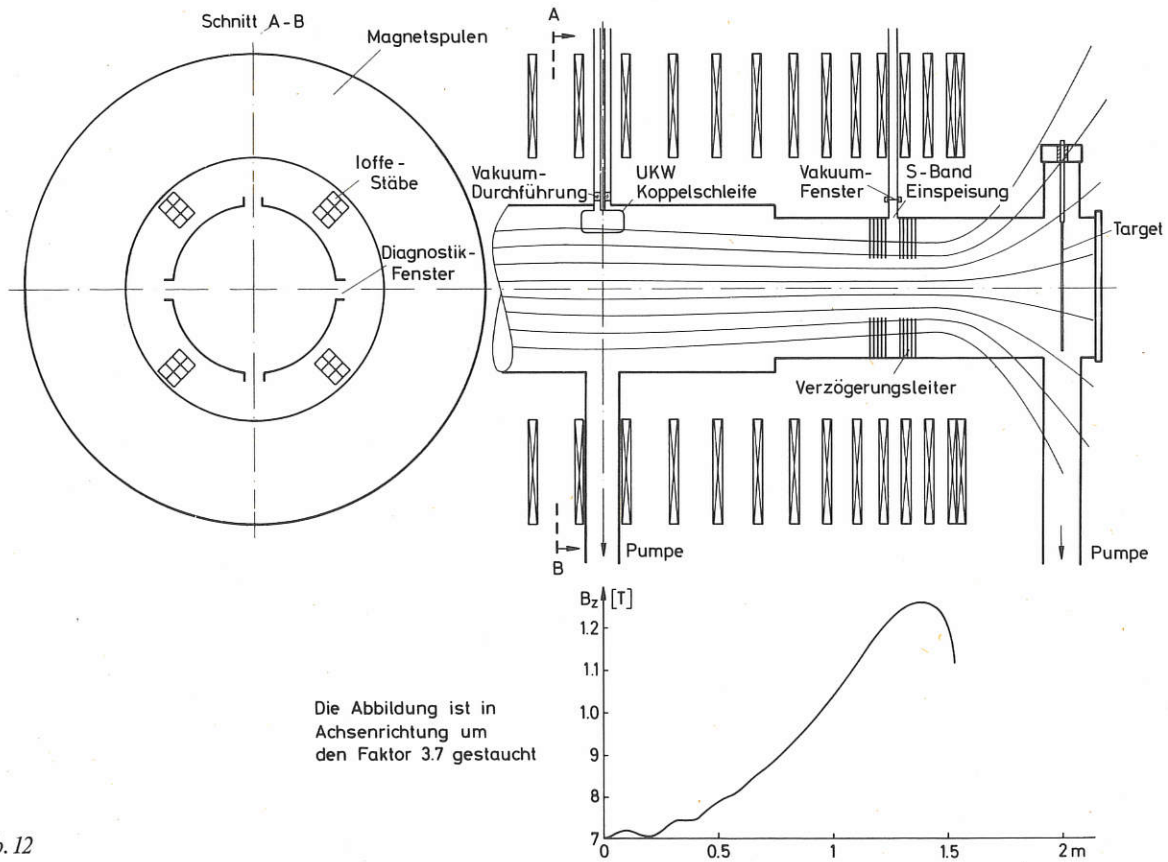


Abb. 11: Axialer Leistungsfluß bei konstanter Spannung an verschieden breiten Schlitten als Funktion der Anzahl der berücksichtigten radialen Moden.
 a) $\alpha = \infty$, homogenes Plasma b) $\alpha = 0,8$ c) $\alpha = 0,65$, hier gibt es eine Schicht $\omega = \omega_p$ (Parameter wie in Abb. 1).

4.1.2 Lineare Wellenrelaxationsexperimente

Das Experiment LIWEREX wurde im Herbst 1974 in Betrieb genommen. Der Aufbau und der Verlauf des magnetischen Spiegelfeldes sind in Abb. 12 skizziert. Aus Gründen der Kühlung werden die Magnetströme für jeweils 7 s mit 30 s

Pause eingeschaltet. Das Plasma wird während dieser Zeit durch einen S-Band Vorionisationsimpuls (2,45 GHz, 1,5 ms, 6 kW) knapp innerhalb des einen Spiegelpunktes erzeugt und durch UKW-Impulse (106 MHz, 1 ms, 30 kW), die mit verschiedenartigen Anordnungen in der Mitte der Maschine



Die Abbildung ist in Achsenrichtung um den Faktor 3,7 gestaucht

Abb. 12

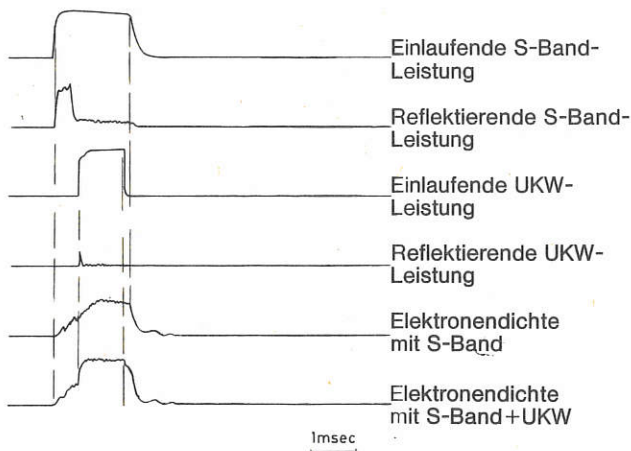


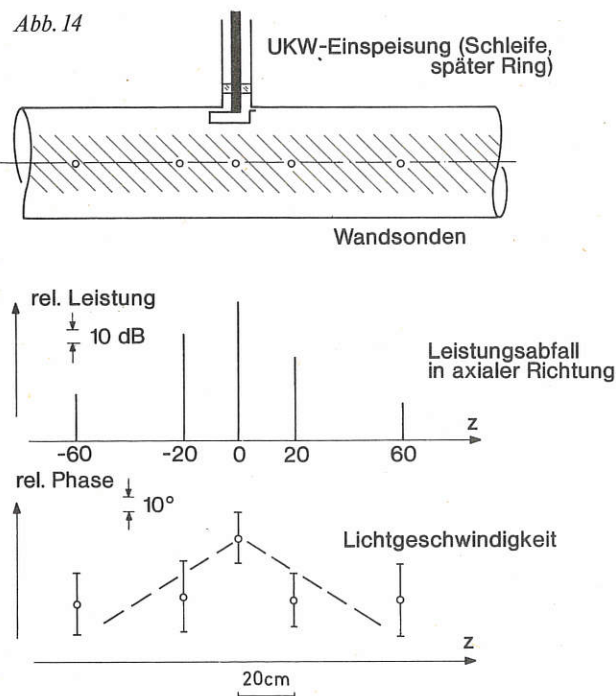
Abb. 13

eingekoppelt werden, weiter aufgeheizt. Die Impulsfolge zur Plasmaerzeugung und -heizung ist 20–40 ms. Abb. 13 zeigt die interessierenden Impulse. An Diagnostik wurde bisher ein 8 mm-Interferometer, Hf-Doppelsonde, Hf-Wandpotentialsonden, Langmuirsonde, diamagnetische Spule, S-Band und UKW-Interferometer eingesetzt. Die erreichten Parameter sind:

- $p : 2 \cdot 10^{-4}$ Torr H_2 ($n_0 \approx 6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)
- $\phi : 7$ cm (Plasmadurchmesser)
- $n_e : 1 - 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
- $T_i + T_e < 20$ eV bei Vorionisation allein
- $T_i : 50 - 100$ eV
- $T_e < 30$ eV mit UKW-Heizung
- $V : 12$ Ltr. (Plasmavolumen)
- $U : 0,2$ Ws (Plasmaenergie)
- $\tau : 10 \mu\text{s}$ (Einschlußzeit aus Energiebilanz)
- $B_0 : 7 - 13$ k Gauss.

Die UKW-Leistung kann nach entsprechender Abstimmung fast reflexionsfrei in das Plasmagefäß eingekoppelt werden.

Abb. 14



Die axiale Änderung der Wandsondensignale wird in Abb. 14 gezeigt und deutet auf eine sehr schnelle Absorption der UKW-Leistung hin. Nichtlineare Vorgänge wurden auch schon beobachtet und zwar das Auftreten von Harmonischen der UKW-Frequenz, Mischung von S-Band und UKW, sowie Seitenbänder bei der UKW-Frequenz im Abstand der Ionenzyklotronfrequenz.

4.1.3 Diagnostik mit schnellen Neutralteilchen

Für die Diagnose heißer Plasmen mit schnellen Neutralteilchen wurden zwei Apparate gebaut und eingesetzt:

Ein **Analysator** (bestehend aus Umladungszelle, Ablenkmagnet, Potentialstufe zum Zurückhalten von Verunreinigungen, Detektor) erlaubt das Energiespektrum von Wasserstoffatomen zwischen ca. 200 eV und 10 keV zu ermitteln, um von hier auf die Ionentemperatur zu schließen.

Ein **Neutralstrahl** (bestehend aus Ionenquelle, Ablenkmagnet und Umladungszelle) gestattet den Analysator zu eichen. Darüber hinaus kann aber dieser (bzw. ein ähnlicher) Neutralstrahl noch direkt zur Diagnostik herangezogen werden, da sein Schicksal im Plasma von vielen Plasma-parametern – in allerdings nicht immer einfacher Weise – abhängt (siehe z. B. IPP-Report H. M. Mayer IPP IV/80, 1975).

Am **PULSATOR** bestimmten C. B. Wharton und M. Brusati mit dem innerhalb der Wellengruppe gebauten und geeichten Analysator die Ionenverteilung und ihr Verhalten beim Eintritt der Abbruch-Instabilität (siehe Beitrag von M. Brusati zum Jahresbericht der PULSATOR-Gruppe).

4.2.1 Laserdiagnostik von Plasmawellen und Turbulenzen

Ziel dieser Experimente ist die Entwicklung und Erprobung von Quellen und Detektoren im Infrarot- und Ferninfrarot-Gebiet, welche für interferometrische Dichtemessungen sowie Streudiagnostik zur Messung der Ionentemperatur und des Spektrums überthermischer Dichtefluktuationen an Plasmen vom TOKAMAK- oder Stellarator-typ verwendet werden können.

Der HCN-Laser mit 337 μm Wellenlänge ist für Dichtemessungen an diesen Plasmen eine ideale Quelle, für kollektive Streumessungen kann bis zu Temperaturen von ca. 2 keV ein CO_2 -Laser (Wellenlänge 10,6 μm) bei Streuwinkeln $0,5^\circ - 1^\circ$ verwendet werden, für höhere Temperaturen ist eine Quelle im langwelligen Infrarot (Wellenlänge $> 300 \mu\text{m}$) notwendig, welche Streuwinkel von $10 - 30^\circ$ erlaubt.

4.2.2 CO_2 -Laser-Experimente

Die Entwicklung eines für Ionentemperaturmessung an Stellarator- und TOKAMAK-Plasmen geeigneten CO_2 -Laser-Streuverfahrens wurde fortgesetzt.

a) Laserentwicklung

Da für homodyne Detektion der von einem thermischen Plasma gestreuten Strahlung eine sehr hohe Frequenzreinheit der Quelle notwendig ist, wurden ausführliche Messungen durchgeführt, um zu ermitteln, wie effektiv das Hybrid- CO_2 -Lasersystem unerwünschte longitudinale Moden unterdrückt. Dazu wurde mittels eines HgCdTe-Detektors das schwache 55 MHz Signal gemessen, welches sich aus der Überlagerung des longitudinalen Hauptmodes mit dem benachbarten longitudinalen Mode ergibt und als Modulation im Ausgangsimpuls auftritt. Bei kontrollierter Variation der Verstärkung der Niederdrucksektion durch Ändern der Ent-

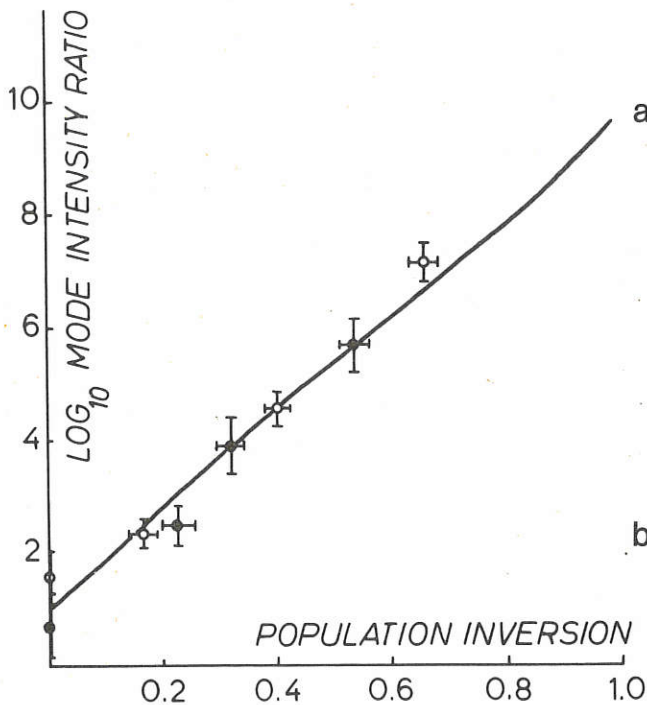


Abb. 15: Abhängigkeit des Verhältnisses der Leistung im longitudinalen Hauptmode zum benachbarten Mode von der Verstärkung der Niederdrucksektion des Hybrid-Lasers.

ladungslänge bei konstantem Strom ergab sich eine experimentelle Abhängigkeit des Verhältnisses der Leistung in der longitudinalen Hauptmode zur benachbarten Mode. Die gemessenen Werte lagen bei 10 bei Verstärkung Null der Niederdrucksektion bis zu größer 10^7 bei 70% der Schwellwertverstärkung (Abb. 15).

b) CO₂-Laser-Streuxperiment

Als Vorversuch wurde ein CO₂-Laser-Streuxperiment bei kleinem Streuwinkel durchgeführt.

Ionenakustische Wellen (Dichtefluktuations $\Delta n/n \approx 10^{-4}$) werden durch ein ebenes Gitter in einem Ar-Plasma mit einer Dichte von 10^{12} cm^{-3} angeregt. 10 kW-Impulse mit einer Dauer von ca. $5 \mu\text{s}$ aus einem CO₂-Hybridlaser werden an den bei 4,5 MHz erzeugten Wellen ($\lambda = 500 \mu\text{m}$) gestreut. Das unter 20 mrad gestreute Licht wird mittels eines HgCdTe-Überlagerungsdetektors gemessen, wobei das zusammen mit dem gestreuten Licht zum Detektor gelangende Falschlicht von ca. 1 mW als Lokaloszillator dient. Das vom Detektor kommende Signal wird um 60 dB verstärkt und ausgefiltert, um das 4,5 MHz-Überlagerungssignal sichtbar zu machen.

Typische Meßergebnisse sind in der Abb. 16 dargestellt, in der die mit (b) und ohne (a) Wellen gewonnenen Detektorsignale miteinander verglichen sind. Der obere Verlauf stellt jeweils das unverarbeitete Ausgangssignal des Detektors, der untere den verstärkten Anteil zwischen 4,3 und 4,7 MHz dar. Die ohne Wellen beobachteten Schwingungen sind lediglich die Fourier-Komponente des Lokaloszillator-Laserpulses in diesem Frequenzbereich. Durch Sondenmessungen der Plasmawellenamplitude wird der Wirkungsgrad des Überlagerungsdetektors mit besser als 10% geschätzt.

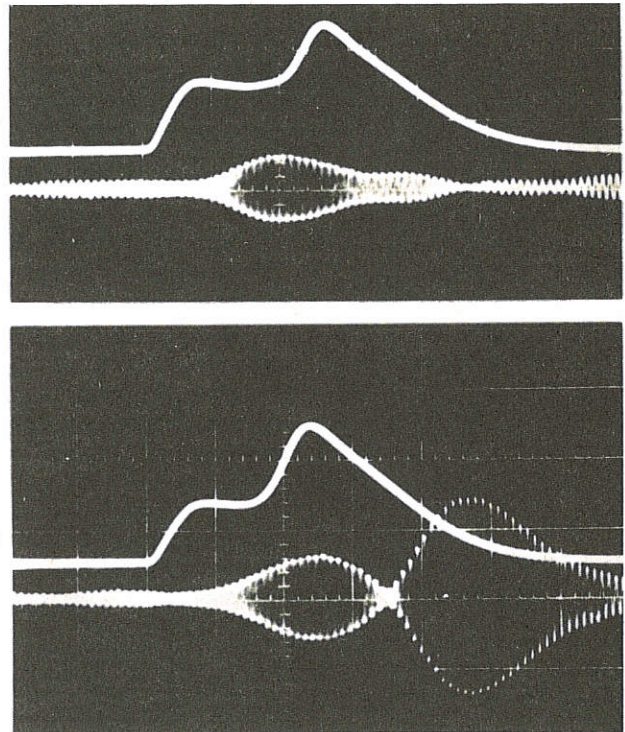


Abb. 16: Typische Streu-Experiment-Meßergebnisse a) ohne Plasmawellen b) mit Plasmawellen.

In Verbindung mit der früheren Feststellung, daß unerwünschte Moden sich durch das CO₂-Hybridlasersystem unterdrücken lassen, deuten diese Ergebnisse darauf hin, daß die Überlagerungsmessung von gestreutem CO₂-Laserlicht im Impulsbetrieb zu einer nützlichen Plasmadiagnostik werden könnte.

4.2.3 HCN-Laser-Experimente

a) Laser-Entwicklung

Die 1973 begonnene Untersuchung eines gepulsten HCN-Lasers wurde abgeschlossen. Dabei wurden Leistungen im Bereich 10–100 W erreicht. Die mittels eines schnellen Whiskerdetektors ermittelten Pulslängen lagen im μs -Bereich. Leistungen nahe 100 W waren nur bei Betrieb mit einer dem Resonator vorgeschalteten Hilfsentladung (Dauerentladung) erreichbar, welche die Leistung um maximal einen Faktor 5 erhöhte, was offensichtlich durch die verstärkte Bildung angeregter HCN-Moleküle bewirkt wurde. Die gepulsten Leistungen liegen maximal nur einen Faktor 10^3 höher als im CW-Betrieb. Weitere Erhöhung ist auch bei TEA-Betrieb nicht zu erwarten. Bei Berücksichtigung der wesentlich kürzeren Integrationszeit für Messungen (μs gegenüber ms – s im Dauerbetrieb) bietet der Puls laser damit keinen echten Vorteil mehr. Auf eine weitere Entwicklung dieses Systems wurde daher verzichtet.

Die Entwicklung des Dauerstrich-HCN-Lasers ist im wesentlichen abgeschlossen. Die höchste Laserleistung liegt bei 100 mW. Zur Stabilisierung von Leistung und Frequenz wird der Laser günstigerweise bei stabiler, geschichteter Entladung betrieben. Bei 50 mW wird dabei eine Linienbreite von ca. 100 kHz bei einer Stabilität der Linienmitte von 200 kHz gemessen. Die Ausgangsleistung läßt sich über

Stunden konstant halten. Kurzzeitige Schwankungen liegen bei einigen Prozent.

Mit diesen Daten ist der Laser als Quelle für interferometrische Dichtemessungen an Plasmen im Bereich 10^{13} bis 10^{14} cm^{-3} bei Plasmadurchmessern von 10–50 cm gut geeignet. Der Einsatz bei Streumessungen ist auf den Bereich stark überthermischer Dichtefluktuationen beschränkt. Für Messungen der Ionentemperatur werden in absehbarer Zeit optisch gepumpte Methylfluoridlaser zur Verfügung stehen, die bei $496 \mu\text{m}$ heute bereits 500 kW in 30 ns Pulsen erreichen.

b) Detektorentwicklung

Für Interferometrie und Streulichtmessungen im fernen Infrarot wird ein Detektorsystem entwickelt, welches zur Messung ein Überlagerungsverfahren mit einer speziellen Diode vom *Whisker*-Typ verwendet. Gegenüber 1973 konnte mit einem 2,5 mm L.O.-Klystron eine Verbesserung der Empfindlichkeit um 10 dB erzielt werden, wobei die Mischung mit der 7. Harmonischen des L.O. erfolgte. Die gemessene NEP betrug $10^{-13} \frac{\text{W}}{\text{Hz}}$. Über diese Experimente wurde auf der International Conference on Submillimeter Waves and their Applications, Atlanta, USA, June 5–7 vorgetragen / 81 /, die wichtigen Resultate wurden veröffentlicht / 82 /.

Zur Reduzierung der hohen Konversionsverluste bei der Harmonischenmischung wurde ein Mischexperiment mit 2 HCN-Lasern durchgeführt, deren Linien um maximal 3 MHz gegeneinander verschiebbar waren. Ein typisches Mischsignal ist in Abb. 17 dargestellt. Die dabei erreichte NEP liegt mit $10^{-15} \frac{\text{W}}{\text{Hz}}$ um 2 Größenordnungen besser als bei Harmonischenmischung.

Computerberechnete Streuspektren für typische Fusionsplasmen zeigen, daß Empfindlichkeit und Bandbreite dieses Empfangsverfahrens ab 1 MW Laserleistung bei $496 \mu\text{m}$ eine Messung von T_i ermöglichen, wobei die Mischung zwischen dem Doppler-verschobenen Streulicht und einem Teil des unverschobenen Laserlichts erfolgt.

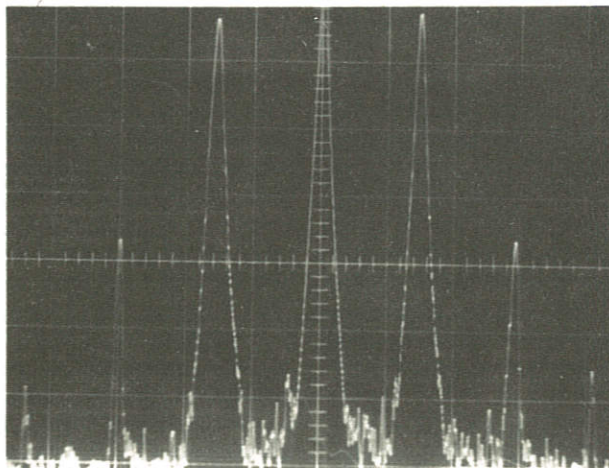


Abb. 17: Mischsignal zweier HCN-Laser mit 3 MHz Frequenzdifferenz

Spektrum symmetrisch zur Frequenz Null (Bildmitte),

$$\frac{S}{N} = 70 \text{ db}, \text{ NEP} = 10^{-15} \frac{\text{W}}{\text{Hz}}$$

Horizontale Achse: 2 MHz/Skalenteil linear

Vertikale Achse: 10 db/Skalenteil logarithmisch

Bereich Theorie

(Prof. Dr. Dieter Pfirsch)

Auf analytischem Weg wurden im Jahre 1974 neue Ergebnisse über Gleichgewichte von Hoch-Beta-Stellaratoren gewonnen.

Die numerischen Codes zur Bestimmung axialsymmetrischer Gleichgewichte wurden ausgebaut. Insbesondere ist es jetzt möglich, Wände aus Materialien mit endlicher Permeabilität einzubeziehen. Die Codes fanden außer im Institut selbst auch wieder in verschiedenen großen ausländischen Plasma-Instituten Anwendung, vor allem für JET. Ähnliches gilt für die Transportcodes, mit denen erste Ergebnisse über das Verhalten von α -Teilchen aus Fusionsprozessen erzielt wurden. Im Zusammenhang mit der Taylor'schen Aussage, daß nur kraftfreie toroidale Entladungen stabil sein sollten, wurde die Frage der Existenz derartiger Gleichgewichte bei endlicher elektrischer Plasmaleitfähigkeit untersucht und negativ beantwortet.

Mit hinreichenden Stabilitätskriterien konnten MHD-stabile axialsymmetrische Gleichgewichte mit metallischer Wand an der Plasma-Oberfläche bis zu einem β von 1% nachgewiesen werden. Die Rechnungen erforderten keine Entwicklung nach irgendwelchen Kleinheitsparametern. Für helikale Gleichgewichte mit Längsstrom wurde mittels des Mercierkriteriums ein in der Nähe der Seele gültiges algebraisches Kriterium hergeleitet, das geometrische Parameter, die Heizstromdichte und β enthält. Für allgemeine toroidale Gleichgewichte wurden Störungen nahe der Plasma-Oberfläche untersucht und ein notwendiges Stabilitätskriterium aufgestellt, das einschränkender als das Mercierkriterium ist. Aus ihm folgt insbesondere für zylindrische Plasmen Instabilität, falls die Rotationstransformation am Rand nicht abfällt. Eine weitere Stabilitätsuntersuchung betrifft Störungen axialsymmetrischer Anordnungen, bei denen das Hauptfeld ungeändert bleibt. Instabilitäten dieser Art können also durch größeres Hauptfeld nicht stabilisiert werden.

Die dissipative trapped-ion Instabilität wurde neu hergeleitet und die daraus resultierende Diffusionsformel verbessert. Anomale Skalierungsgesetze wurden für verschiedene Stoßfrequenzbereiche ausgewertet. In der Grenze hohen β 's wurde die elektromagnetische Drift-Instabilität untersucht.

Mittels Simulationsrechnungen wurde die stimulierte Raman-Streuung, die stimulierte Brillouin-Streuung, der Zerfall in zwei Plasmonen und die Ionenakustische Zerfallinstabilität bei der Wechselwirkung von Laserlicht mit Plasmen behandelt. Elektrische Leitfähigkeit und anomaler Transport in turbulenten Plasmen wurden im Rahmen einer Fokker-Planck-Gleichung untersucht und die Möglichkeit der turbulenten Heizung in großen Anordnungen diskutiert; wegen Selbstauslöschung und Skineffekt erweist sie sich als wenig geeignet.

Makroskopische Transportgleichungen für Verhältnisse, bei denen – wie in lasererzeugten Plasmen – Strömungsgeschwindigkeiten vergleichbar mit der thermischen Geschwindigkeit auftreten, sind unter Verwendung von REDUCE im Rahmen einer 13 Momentenentwicklung aufgestellt worden.

Die Ionenzyklotronheizung wurde unter Berücksichtigung der Inhomogenität des Magnetfelds in toroidalen Anordnungen neu berechnet. Zur Benutzung in den Transportcodes wurden neue Interpolationsformeln für die Zyklotronstrahlung eines magnetisierten Plasmas bestimmt.

Die Untersuchungen im Bereich der numerischen Mathematik betrafen vorwiegend Fragen im Zusammenhang mit den Gleichgewichts- und Transportcodes.

Im Rahmen des Wissenschaftler-Austausches mit der Universität in Austin (Texas/USA) hat uns Dr. Wong besucht. Dr. Lackner war wieder für einige Zeit in Austin. Dr. v. Finckensten ist einem Rufe der Technischen Hochschule Darmstadt gefolgt.

1. THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN

(K. Borrass, R. Croci, C. T. Dum, P. Graeff, B. Green, J. J. Henning), W. Kerner, D. Lortz, J. Nührenberg, D. Pfirsch, E. Rebhan, R. Saison, A. Salat, F. Sardei, H. Tasso, H. K. Wimmel)*

Die hier behandelten Ergebnisse beruhen vorwiegend auf theoretischen Berechnungen, enthalten aber auch z. T. umfangreiche numerische Berechnungen und algebraische Manipulationen auf der Rechenanlage.

1.1. Gleichgewichte, Stabilität

Diese Berechnungen sind in gewissem Sinne komplementär zu numerischen Behandlungen; letztere erlauben zwar eine realistischere Behandlung von Randbedingungen und geometrischen Konfigurationen, sind aber bislang nur für Anordnungen genügend hoher Symmetrie (Rotationssymmetrie, helische Symmetrie o. ä.) möglich. Numerische Stabilitätsuntersuchungen machen außerdem bei schwachen oder stark lokalisierten Moden große Schwierigkeiten.

Um Gleichgewichte vom Typ des Hoch- β -Stellarators zu erhalten, wurden Gleichgewichte mit unendlichen Sätzen von „Korrugationsfeldern“ erster Ordnung betrachtet, deren Wechselwirkung die toroidale Gleichgewichtsbedingung näherungsweise zu erfüllen gestattet. Für $\ell = 0,1$ (Scyllac) und $\ell = 1,2$ (HBS)-Gleichgewichte treten unendlich viele Paare auf. Durch numerische Minimalisierung der Abweichung vom Gleichgewicht konnten bei Berücksichtigung von nur zwei Paaren bei glatten Profilen befriedigende Näherungen erzielt werden, während die Ein-Paar Näherung unzureichend ist (J. Nührenberg).

Eine Auswertung früher entwickelter hinreichender Stabilitätskriterien erlaubt die Konstruktion MHD-stabiler axial-symmetrischer Gleichgewichte. Danach ist die Existenz von stabilen TOKAMAK-Konfigurationen a) mit einem β von 1%, b) mit einem Aspektverhältnis von fünf gesichert. Als günstig erweisen sich glockenförmige Strom- und Druckprofile / 147 / (D. Lortz, J. Nührenberg).

Hinreichende Kriterien sind zu pessimistisch, notwendige, wie das von Mercier, zu optimistisch; letzteres ist ein Krite-

rium für lokalisierte Störungen, daher also besonders dort brauchbar, wo numerische Behandlungen Schwierigkeiten bereiten. Für helikale Gleichgewichte mit Längsstrom wurde daher das Mercier-Kriterium in der Nähe der magnetischen Achse in eine möglichst bequem zu handhabende Form gebracht, die von fünf geometrischen und physikalischen Parametern abhängt (D. Lortz, J. Nührenberg).

Lokale Instabilitäten am Plasmarand („Peeling“) sind mit den bisherigen Kriterien wegen des angrenzenden Vokums nicht zu erfassen. Das entwickelte Kriterium ist einschneidender als das von Mercier und verlangt z. B. für ein zylindrisches Plasma am Rand abfallende Rotationsformation und gibt außerdem eine kritische Beziehung zwischen Verscherung und Druckgradient (D. Lortz).

Eine weitere Klasse von Instabilitäten ist für die am IPP geplanten Experimente mit magnetischem Limiter (ASDEX, PML) außerordentlich wichtig. Da die magnetische Separatrix den stabilisierenden Einfluß von leitenden Gefäßwänden reduzieren oder sogar aufheben kann, führen starre Verschiebungen oder Kippen der Konfiguration evtl. zu einer Abnahme der Energie. Hinreichende Stabilitätskriterien fordern $q \geq 1$. Außerdem darf bei einem Plasmaquerschnitt in Form einer stehenden Ellipse deren Achsenverhältnis nicht zu groß werden. Dreieckige Verformung und kleines Aspektverhältnis A wirken beide stabilisierend. So ist z. B. eine Ellipse mit Achsenverhältnis 1.2 für A = 3 ohne Verformung sicher stabil gegen die betrachteten Störungen / IPP 6/127 / (E. Rebhan).

Etwas allgemeiner sind Störungen, die das Plasma so verformen, daß das toroidale Hauptfeld unbeeinflusst bleibt; sie können daher durch letzteres nicht stabilisiert werden. Im Grenzfall schlanker Toren ist bei elliptischem Querschnitt nur der Kreisfall stabil. Im Torus mit Oberflächenströmen erweist sich eine zu gestreckte Ellipse (stehend oder liegend) als instabil. Das Oberflächenstrommodell läßt sich mittels Integralgleichungen numerisch praktisch vollständig behandeln (E. Rebhan, A. Salat).

Eine weitere Methode, mit der allerdings nur Instabilität gezeigt werden kann, ist das Einsetzen von geeignet ge-

*) Gastforscher, Atomic Energy Board, Pelindaba, Pretoria, Republic of South Africa

wählten Testfunktionen in das Energieintegral. Testfunktionen nahe den Eigenfunktionen eines gestreckten Plasmas („Kink-Moden“) können für Aspektverhältnisse $A > 5$ näherungsweise der Toruskrümmung angepaßt werden. Für analytisch exakte Gleichgewichte läßt sich damit das Energieintegral im Prinzip vollständig auswerten. Diese algebraische Auswertung ist aber praktisch nur noch – z. B. mit Hilfe des Systems „REDUCE“ – auf der Rechenanlage möglich, wobei das umfangreiche Resultat zuletzt numerisch ausgewertet werden kann. Da „Kink-Moden“ den resistiven „Tearing-Moden“ eng verwandt sind, ist diese Untersuchung u. a. von Bedeutung für das Verständnis der in TOKAMAKS beobachteten Abbruch-Instabilität / 120, 218 / (H. Tasso, W. Kerner).

Die Berücksichtigung der endlichen Leitfähigkeit führt nicht nur zu neuen Instabilitäten wie oben; auch das Gleichgewicht wird beeinflußt, jedenfalls nach genügend langer Zeit. So läßt z. B. ein einfaches ohmsches Gesetz kein stationäres kraftfreies Feld zu. Dies Ergebnis widerspricht einer kürzlich vorgetragenen Theorie von J. B. Taylor, nach der der Endzustand einer TOKAMAK-Entladung i. A. stets ein kraftfreies Plasma sein sollte (H. Tasso).

Eine kürzlich veröffentlichte Theorie zur Driftinstabilität in kraftfreien Plasmen hohen Drucks*) konnte richtiggestellt und erweitert werden (R. Saison).

Für den Einfluß der bei der Laserkompression eines D-T-Kügelchens freigesetzten Fusionsenergie auf das dynamische Verhalten gibt es bislang kein einfaches und analytisches Modell. Der Einfluß der produzierten Energie auf das Temperaturfeld kann analytisch behandelt werden. Das hydrodynamische Verhalten scheint durch analytische Ausdrücke approximierbar zu sein (J. J. Henning).

1.2 Transportphänomene

Die hier vorgestellten Untersuchungen sind nicht Resultate großer numerischer Berechnungen; letztere erscheinen in einem gesonderten Kapitel.

Zur Extrapolation bisheriger und zukünftiger experimenteller TOKAMAK-Ergebnisse auf einen möglichen Fusionsreaktor scheinen die anomalen Elektronen- und Ionen-Wärmeleitfähigkeiten – verursacht durch die driftdissipative Instabilität und die durch die in den Hauptfeldspiegeln gefangenen Elektronen und Ionen verursachten Instabilitäten – besonders wichtig zu sein. Die zugehörige Energiebilanz erlaubt eine Skalierung der relevanten Parameter. Da Strahlung und Verluste durch Ladungsaustausch vernachlässigt werden, ergeben die erhaltenen Gesetze eine optimistische Abschätzung des Verhaltens eines TOKAMAKS (D. Pfirsch, R. Saison, H. K. Wimmel).

Für das Verständnis von anomalen Transporterscheinungen insbesondere in turbulenten Plasmen gibt es nur wenig gut fundierte theoretische Grundlagen und Methoden. Zur Berechnung der Leitfähigkeit z. B. stört man das Plasma durch ein Testteilchen oder eine Testwelle und bestimmt die Reaktion: die sog. „Response“-Funktionen. Beschreibt man das Plasma mit der Vlasov-Gleichung, so muß der Stoßterm oder die Turbulenz (z. B. quasilineare Diffusion im Geschwindigkeitsraum) bereits in der ungestörten Gleichung berücksichtigt werden; die „Response“-Funktionen

sind nicht mehr als Integrale längs der ungestörten Teilchenbahn darstellbar. Fluktuationen wirken dabei ähnlich wie Stöße. Die dadurch bedingte Komplikation erfordert neue Approximationsmethoden, die z. T. noch entwickelt werden.

Bei der Wellen-Elektronen-Wechselwirkung bewirken Oszillationen kleiner Phasengeschwindigkeit hauptsächlich eine elastische Streuung der Elektronen – ähnlich Elektronen-Ionenstößen. Die entsprechende quasilineare Modifikation der elektrischen Leitfähigkeit und die resultierende Elektronenheizung wurden durch umfangreiche Simulationsexperimente auf der Rechenanlage bestätigt / 67 /. Andere nichtlineare Effekte können bei den in der Simulation auftretenden Fluktuationsniveaus keine Rolle spielen. Ein schwaches Magnetfeld senkrecht zur Stromrichtung ergibt eine Drehung des Spektrums von 10° – 20° gegen die Stromrichtung und eine Verschiebung der Niveaulinien der Verteilungsfunktion, was ebenfalls durch Simulation bestätigt wurde.

Eine vollständige Theorie anomaler Elektronen-Transportkoeffizienten konnte bereits abgeleitet werden, wobei sich interessante Unterschiede zur klassischen Theorie in der Struktur und der Abhängigkeit vom Magnetfeld ergeben. Insbesondere können die effektiven Stoßfrequenzen mehrere Größenordnungen über den entsprechenden klassischen Werten liegen. Eine Anwendung der Theorie auf den hiesigen Theta- und Belt-Pinch wurde bereits durchgeführt / 49 /.

Ein einfaches Modell für turbulente Heizung und Skineffekt läßt erstere für große Maschinen wie JET wegen der Selbstausschöpfung der entsprechenden Instabilität und wegen des großen Skineffekts als ungeeignet erscheinen. Die Untersuchungen sind aber für die Anfangsphase der ohmschen Heizung von großer Bedeutung (C. T. Dum).

Wegen der in Laser-Plasmen auftretenden hohen Geschwindigkeiten – sie sind mit der thermischen Geschwindigkeit vergleichbar – ist die klassische Transporttheorie auch dort nicht anwendbar, aber die Transportgleichungen für ein vollionisiertes Mehrkomponentenplasma lassen sich auch dann noch mittels des 13-Momenten-Ansatzes aus der Fokker-Planck-Gleichung herleiten. Allerdings erfordert die Berechnung der umfangreichen Stoßterme erheblichen Aufwand, der mittels des algebraischen Systems REDUCE auf der Rechenanlage bewältigt wurde. Näherungen für kleines Massenverhältnis sowie erste Korrekturen zu linearisierten Ausdrücken wurden ebenfalls auf diesem Wege gewonnen / IPP 6/125 / (A. Salat).

Bei Plasmaparametern, wie sie in zukünftigen Experimenten erhofft und im Fusionsreaktor auftreten werden, kann eine durch die gefangenen Teilchen ausgelöste Instabilität die Diffusion erheblich vergrößern. Eine Untersuchung der Verarmung der gefangenen Ionen bei hohen, durch die „Trapped Ion“-Instabilität verursachten Diffusionsverluste, wobei entweder allein elastische Stöße für die Nachlieferung sorgen oder die inverse „Loss Cone“-Instabilität die Verarmung begrenzt, läßt die Möglichkeit stark verringerter Verluste zu.

Eine neue Herleitung der von Kadomtsev-Pogutse aufgestellten Diffusionsformel für obige Instabilität aus den Ori-

*) A. El Nadi, M. N. Rosenbluth, Phys. Fluids 16, 2036, (1973)

ginalgleichungen mit einer allgemeineren Methode erwies sich als aussagekräftiger. Sie erlaubt, verbesserte zugehörige Flüssigkeitsgleichungen aufzustellen, die u. a. den Einfluß des zum Magnetfeld parallelen elektrischen Feldes und des Gradienten vom Verhältnis gefangene Teilchendichte zur Gesamtdichte berücksichtigen. Die Diffusion ist danach proportional zum Gradienten der Gesamtdichte, nicht dem der gefangenen Teilchen (*H. K. Wimmel*).

Zur gleichen Instabilität kann durch Momentenbildung an der drift-kinetischen Gleichung eine Kontinuitätsgleichung für die gefangenen Teilchen gewonnen werden. Die dabei erhaltenen Korrekturterme zu *Kadomtsev-Pogutse* bestätigen die eben genannten Ergebnisse. Der in der Gleichung auftretende Stoßterm läßt sich als Krook-Term schreiben, wobei die Stoßfrequenz wesentlich vom Temperaturgradienten abhängt (*J. J. Henning, F. Sardei*).

Das Studium der Wirkung einiger stabilisierender Effekte auf die dissipative „Trapped Ion“-Instabilität ist wegen der vorausgesagten hohen Verluste wichtig. Die Instabilität scheint empfindlich von den radialen Dichte- und Temperaturprofilen abzuhängen. Die Ionen-Stoßdämpfung wird durch Verunreinigungen erhöht, hängt aber kritisch von deren Verteilung ab und scheint für bedeutende Stabilisierung wegen der starken Strahlung unerwünscht hohe Konzentrationen zu erfordern. Eine globale Energiebilanz für einen TOKAMAK-Reaktor deutet an, daß mit vernünftiger zusätzlicher Heizung auch bei Auftreten der „Trapped Ion“-Instabilität noch ein Netto-Energiegewinn möglich ist. / 86 / (*B. J. Green, D. Marty**), *D. Pfirsch, R. Saison, H. K. Wimmel*).

1.3 Wellenheizung und Strahlung

Wegen der starken Abnahme des elektrischen Widerstandes eines Plasmas mit zunehmender Temperatur ist die ohmsche Heizung sehr ineffektiv, wenn man damit Fusionstemperaturen erreichen will. Von den alternativen Möglichkeiten hat neuerdings der Vorschlag, eine schnelle ionenakustische Welle bei der Gyrofrequenz zur Heizung heranzuziehen, zunehmendes Interesse gefunden.

Bisherige Modelle berücksichtigen Toruseffekte nur über die radiale Abnahme des Hauptmagnetfeldes, was stets zu einer starken Abnahme der absorbierten Hochfrequenzleistung und damit der Heizung gegenüber einem Plasma in einem homogenen Feld führte. Berücksichtigung der Rotationsformation erhöht die absorbierte Leistung, und es werden auch vom Azimut unabhängige HF-Moden absorbiert. Stoßfreie und stoßdominierende Plasmen zeigen dabei ähnliches Verhalten / IPP 6/130 / (*R. Croci, G. Catanei*).

Die Zyklotronstrahlung führt bei den aus anderen Gründen erwünschten hohen Magnetfeldern in einem Fusionsreaktor u. U. zu einem beträchtlichen Energieverlust. Eine numerische Berechnung des Absorptionskoeffizienten und der Strahlungsverluste in einfachen Konfigurationen – Plasmaplatte und -zylinder – in linearer Näherung aber ohne weitere Annahmen ergab z. T. beträchtliche Abweichungen von bisher bekannten Ergebnissen. Eine Bilanz von Brems- und Zyklotron-Strahlungsverlusten gegen Fusionsleistung führt zu einer kritischen Länge, oberhalb derer erst ein Netto-Energiegewinn möglich ist. Danach ist ein DD-Reaktor praktisch ausgeschlossen, während die DT-Reaktion bei

einem Magnetfeld von 50 kGauß und einer Teilchendichte von 10^{14} pro ccm eine kritische Länge von 2 cm ergibt. Diese Länge wächst allerdings extrem stark mit abnehmender Dichte (*J. J. Henning, F. Pohl*).

2. NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN

(*D. Biskamp, D. Düchs, K. v. Hagenow, K. Lackner, D. Pfirsch, F. Pohl, H. Welter*)

Dieses Kapitel enthält Untersuchungen und Ergebnisse, die vorwiegend auf z. T. umfangreichen numerischen Rechnungen beruhen. Die dabei entwickelten numerischen Methoden werden, soweit sie von dem speziellen Problem unabhängige Bedeutung haben, im nächsten Kapitel vorgestellt.

2.1 Gleichgewichte

Zur Bestimmung realistischer MHD-Gleichgewichte sind numerische Methoden unerlässlich, da nur so technische Gegebenheiten wie vorgegebene Leiter, leitende Wände etc. wirklich berücksichtigt werden können. Das Garching IPP-Programm für rotationsymmetrische Gleichgewichte wurde so geändert, daß die linearisierte Gleichung auch ohne Randbedingungen im Endlichen mittels eines Differenzen-Verfahrens effektiv gelöst werden kann. Im Gegensatz zu der früher benutzten Entwicklung nach *Jacobi-Poynten* lassen sich jetzt auch große Aspektverhältnisse behandeln. Ferner wurde die Einschränkung auf Symmetrie zur Äquatorebene beseitigt und ein neues Iterationsverfahren zur Berechnung der Multipol- und Vertikalströme in vorgegebenen Leitern bei vorgegebener Lage der magnetischen Achse entwickelt. Dazu wurde ein Test für die Stabilität gegen Vertikalschiebungen eingebaut.

Anwendungen betrafen JET (Kreis- und D-förmige Querschnitte), Gleichgewichte mit Divertor und die Berechnung der äußeren Spulenströme, ASDEX, den PULSATOR-Umbau (PML), sowie W VII A (*H. Wobig*). Das Programm wurde dem Institut für Plasmaphysik der KFA in Jülich und dem CEN in Fontenay aux Roses zur Verfügung gestellt.

Ein Vorschlag für einen sich öffnenden magnetischen Limiter, der vor allem der besseren Kontrolle der Zündphase dienen soll, wurde für ASDEX und einen auf Reaktor-dimensionen skalierten ASDEX-ähnlichen TOKAMAK erfolgreich durchgeführt / 96 / (*K. v. Hagenow, K. Lackner*).

2.2 Transport

Die eben genannten Rechnungen geben keinen Aufschluß über Plasmaverluste. Die hier vorgestellten Berechnungen erlauben die Berücksichtigung von verschiedenen Transportkoeffizienten, Verunreinigungen, mehreren Plasma-Komponenten, usw., wobei geometrische Effekte nur durch Mittelung berücksichtigt sind.

Berechnungen für die diffusionsbestimmte Phase des BELT PINCH im Institut wurden unter Berücksichtigung der Einflüsse von neutralem Wasserstoff, O und C Verunreinigungen, Heizung durch toroidale und poloidale Ströme, Ionisation, Linien – und Bremsstrahlung, sowie Ladungsaustausch-Verlusten durchgeführt / 17 /.

Eine Erweiterung des Programms erlaubt die Behandlung der von der Wand kommenden Verunreinigungen, des mehrfachen Ladungsaustausches, ferner der Heizung durch Neu-

*) CEN, Fontenay aux Roses/Frankreich

tralteilcheneinschluß und adiabatische Kompression sowie die näherungsweise Berücksichtigung eines Divertors durch entsprechende Randbedingungen. Damit wurden Modellrechnungen für gegenwärtige und zukünftige TOKAMAKS durchgeführt. Zur Kontrolle der Verunreinigungen wurden eine kalte Plasmaschicht und ein poloidaler Divertor näher untersucht / 149 / (D. Düchs).

In einem Fusionsreaktor haben die bei der Verbrennung entstehenden α -Teilchen die Tendenz, nach innen zu diffundieren. Eine kinetische Gleichung für die Verteilungsfunktion, deren Abhängigkeit von den Ortskoordinaten in Abhängigkeit z. B. von den neoklassischen Flüssen gegeben ist, wurde abgeleitet. Die Flüsse müssen für mehrere Gruppen von α -Teilchen bestimmt werden. Auswertung für nur eine Gruppe unter Reaktorbedingungen zeigt, daß selbst bei Erhöhung der neoklassischen Flüsse um den Faktor 100 nach 17 sec nur etwa 10% der erzeugten α -Teilchen verloren gehen. Da das 1-Gruppenmodell zu optimistisch ist, scheint ein stationärer Reaktor kaum möglich / 65 / (D. Düchs, D. Pfirsch).

Berechnung zum Transport in TOKAMAK-Plasmen wurden in großem Umfang auch für ASDEX / 1 / und JET durchgeführt, letzteres insbesondere im Zusammenhang mit der vom IPP für JET vorgeschlagenen Heizung durch adiabatische Kompression. Das vollständige Programm wurde der JET-Gruppe, dem Institut für Plasmaphysik der KFA in Jülich und CNEN Frascati (Padua) zur Verfügung gestellt (D. Düchs).

Zur Bestimmung der Helium-Konzentration in der Nähe einer α -bestrahlten Metalloberfläche wurde ein numerisches Diffusionsmodell entwickelt, das die Bedingung von He-Atomen an Störstellen und Dislokationen im Gitter berücksichtigt / 176 / (F. Pohl).

2.3 Laser-Plasma-Wechselwirkungen

Anderorts entwickelte Programme zur Behandlung eines durch Laserlicht komprimierten Kügelchens sind uns leider nicht zugänglich. Deshalb wurde ein 1-dimensionales sphärisches Modell mit klassischer Elektronenwärmeleitung, lokaler Absorption der Energie der bei der Fusion erzeugten α -Teilchen und Vernachlässigung der Ionenwärmeleitung entwickelt. Innerhalb der durch obige Vereinfachung bedingten Grenzen stimmen die Ergebnisse mit publizierten überein / 140 / (K. Lackner).

Experimente zeigen anomale (nicht klassische) Absorption und Reflektion von Laserlicht an Laser-erzeugten Plasmen. Umfangreiche numerische Simulationsexperimente dienen dem Verständnis der komplexen Vorgänge. Im wesentlichen führen parametrische Prozesse sowohl in der Plasmakorona (Dichte kleiner als die durch die Lichtfrequenz bestimmte kritische Dichte) als auch in der Nähe der kritischen Dichte zu erhöhter Absorption und Streuung des Lichts. Es sind dies die stimulierte Raman-Streuung (SRS), die stimulierte Brillouinstreuung (SBS), der Zerfall in zwei Plasmonen bei $1/4$ der kritischen Dichte und die ionenakustische Zerfallinstabilität bei der kritischen Dichte selber.

Die Eigenschaften der SRS bei vorgegebenem (inhomogenen) Ionendichteprofil wurden im wesentlichen erklärt. Theorie und 2-dimensionale Simulation stimmen darin überein, daß Raman-Seitstreuung in inhomogenen Plasmen die dominierende Rolle spielt. Bei schrägem Einfall ist die Seitstreuung vor allem rückwärts gerichtet. Im nichtlinearen Verhalten kann man zwei Fälle unterscheiden:

1. Für Laserintensität in der Nähe des Schwellwertes ein nicht dissipativer Bereich, wo die Sättigung der parametrischen Instabilität durch Wellenkopplung bestimmt wird. Das Spektrum des gestreuten Lichts enthält neben der Raman-Linie bei $\omega_0 - \omega$ (ω = Frequenz der Plasmaschwingung) eine Anzahl von Linien $\omega_0 + n\omega$.
2. Für Intensitäten weit über dem Schwellwert einen dissipativen Bereich, in dem starke Elektronenheizung auftritt und zu einem Schweif in deren Verteilung führt, wobei die Sättigung durch lineare Landaudämpfung der Plasmawellen an dem Schweif beschrieben werden kann.

Durch den 2-Wege-Zerfall wird ein Paar von Plasmaplasma mit der Frequenz $1/2 \omega_0$ angeregt, wo bei schrägem Einfall die nach außen laufende die größere Amplitude hat. Von den Überlagerungsfrequenzen $1/2 \omega_0$, $3/2 \omega_0$ führt letztere daher zu stärkerer Ausstrahlung. Dieser Effekt, sein gegenüber SRS erniedrigter Schwellwert und die Tatsache, daß der Prozeß im Gegensatz zur Raman-Streuung für jeden Einfallswinkel bei $1/4$ der kritischen Dichte stattfindet, legen die Erklärung der experimentell beobachteten Frequenz $3/2 \omega_0$ durch den 2-Wege-Zerfall und nicht wie bisher durch SRS nahe.

SRS führt zu starker, praktisch absorptionsfreier Streuung. Rückwärts gerichtete Seitstreuung ist die am stärksten angeregte Mode. Ebenso führt der ionenakustische Zerfall bei der kritischen Dichte zu einer gewissen im wesentlichen rückwärts gerichteten Streuung. Es wurde näher untersucht, wann welcher der beiden Prozesse dominiert.

In allen Fällen ist die gesamte Reflektivität $\geq 40\%$. Dies steht in deutlichem Gegensatz zu experimentellen Beobachtungen in dem betrachteten Bereich von Laser-Intensitäten, wo $R \leq 10\%$ zu sein scheint. Eine anomal reduzierte Wärmeleitung im Experiment, die zu wesentlich höherer Koronatemperatur führen müßte, als sich in den Rechnungen einstellt, könnte eine Erklärung dafür abgeben / 29 /, / 32 / (D. Biskamp, H. Welter).

3. ENTWICKLUNG NUMERISCHER METHODEN

(D. Düchs, O. Eder, K. v. Finckenstein, K. v. Hagenow, R. Meyer-Spasche, F. Sardei, U. Schwenn, H. Pilssticker)

In diesem Kapitel werden numerische Verfahren vorgestellt, soweit sie allgemeines Interesse besitzen oder unabhängig von speziellen Problemen entwickelt wurden.

3.1 Partielle Differentialgleichungen

Die numerische Behandlung von Transport im Plasma führt i. A. auf nichtlineare Diffusionsgleichungen. Implizite Differenzgleichungen für einzelne Gleichungen konnten praktisch vollständig auf ihre Stabilität und Konvergenz untersucht werden / 75 /. Stark gekoppelte Systeme scheinen ebenfalls damit numerisch lösbar zu sein, falls die Matrix, die hier an die Stelle des Diffusionskoeffizienten tritt, überall positive Eigenwerte hat. Exakte Konvergenzbeweise werden angestrebt (D. Düchs, K. v. Finckenstein).

Implizite Differenzenverfahren für 2-dimensionale zeitabhängige Probleme mit weitgehend direkter Lösung der dabei auftretenden linearen Gleichungssysteme wurden entwickelt und konnten z. T. mit bekannten Verfahren („Fractional Step“, ADI) verglichen werden (D. Düchs, U. Schwenn).

Ein gemischtes Euler-Lagrange-Differenzen-Schema für Gleichungen mit Konvektion und Diffusion wurde entwickelt, wobei die Konvektion nach Lagrange behandelt wird, also Massenerhaltung garantiert ist. Eine geeignete Näherung für die Geschwindigkeit sorgt für die Verträglichkeit zwischen dem teilchenfesten Lagrange-Gitter und dem ortsfesten Euler-Gitter (*F. Sardei*).

Die numerische Behandlung axial-symmetrischer Gleichgewichte führt auf nichtlineare Randwertprobleme mit u. U. mehreren Lösungen. Einige Sätze zur Konvergenz des Newton-Verfahrens und der benutzten Differenzenverfahren konnten abgeleitet werden. Ein verbessertes numerisches Verfahren erlaubt auch die Behandlung von Lösungen in der Nähe des Verzweigungspunktes (*R. Meyer-Spasche*).

Ausgleichsrechnung und koordinatenunabhängige Interpolation wurden auf ihre Eignung zur Verringerung der benötigten Stützstellen und zur Behandlung irregulärer Gitter bei Differentialgleichungen geprüft (*O. Eder*).

3.2 Spezielle Programme

Die allgemein zugängliche Programmbibliothek IPPLIB wurde um mehrere Programme zur Lösung von Eigenvektor-Eigenwertproblemen auch allgemeiner Art sowie zur Bestimmung des Minimums einer Funktion mehrerer Variablen mit Zusatzbedingungen erweitert (*H. Pillsticker*).

4. BIBLIOTHEK, DOKUMENTATION

4.1 Bibliothek

(*L. Johannsen*)

Bestand der Hauptbibliothek und der neun Handbibliotheken am 31. 12. 74:

- 20 776 Bücher
- 25 293 Reports, Dissertationen, Patentschriften
- 900 Microfiches
- 70 Mikrofilme
- 9 040 Zeitschriftenbände
- 518 Lfd. Zeitschriftenabonnements

Davon Neuzugänge im Berichtsjahr:

- 1 982 Bücher (etwa 50% der zur Ansicht besorgten Bücher wurden gekauft)
- 2 598 Relevante Reports
- 101 Dissertationen
- 76 Patentschriften
- 480 Zeitschriftenbände

Informationsdienste:

Es wurden zusammengestellt und verteilt:

- 26 Wöchentliche Vortragskalender
- 175 Einzelankündigungen von Vorträgen
- 4 Titellisten der Vorträge, der veröffentlichten und zur Veröffentlichung eingereichten Arbeiten des IPP
- 1 Alphabetisch angeordnete Liste der IPP-Berichte und Veröffentlichungen des Jahres 1974
- 12 Kalender in- und ausländischer Tagungen
- 21 Neuerwerbslisten der Bücher
- 56 Neuerwerbslisten der Reports

Veröffentlichungen:

Im Berichtsjahr wurde die Veröffentlichung von 128 Manuskripten von IPP-Wissenschaftlern in Zeitschriften und Konferenzberichten über die Bibliothek abgewickelt.

Versand:

106 Neue Sonderdrucke von IPP-Veröffentlichungen und 67 neue IPP-Berichte wurden innerhalb des Instituts und außerdem nach 18 verschiedenen Verteilerschlüsseln an insgesamt 694 ständige Adressen in 37 Ländern verschickt.

Übersetzungen:

Die Übersetzung von 34 russischen Arbeiten und einer dänischen Arbeit wurde veranlaßt.

4.2 Dokumentation

(*K. v. Hagenow*)

Die folgende Übersicht nennt die Zahl der 1974 klassifizierten Publikationen und Reports sowie den Gesamtbestand per 31. 12. 1974, der einer maschinellen Recherche zugänglich ist:

	1974	Gesamt
Plasma Physics Index	5 483	43 178
Vacuum and Surface Index	2 033	18 288
Technology Index	2 672	18 178

Ferner wurde eine monatliche Titelliste der in der Dokumentation erfaßten Arbeiten aus den wichtigsten Zeitschriften erstellt.

Projekt Plasma-Wand-Wechselwirkung

(Dr. Heinz Vernickel)

Die Plasma-Wand-Wechselwirkung beruht auf dem Zusammenwirken einer Vielzahl von Prozessen, deren relative Wichtigkeit u. a. abhängt von Art und Dauer der Entladung, von der erreichten Energie und Einschlußzeit, vom Material der Wände, die das Plasma „sieht“ sowie von dessen Oberflächenzustand. Neben die Untersuchung der Einzelprozesse und die übliche Plasmadiagnostik muß daher eine Diagnostik der Wände von Plasmaapparaturen treten.

Dazu wurden Untersuchungen an einem aus PULSATOR ausgebauten Limiter durchgeführt, die interessante erste Aufschlüsse über den Transport von Wandmaterial in dieser Maschine erbrachten. Die Anlage QWAASS zu in-situ-Untersuchungen von Oberflächen in Plasmamaschinen wurde zu Ende des Jahres geliefert und an PULSATOR angebaut. Die Überlegungen zur Wandererosion und zum Verunreinigungsproblem in Reaktoren wurden weitergeführt.

Das Schwergewicht der Arbeiten lag – wie in den letzten Jahren – bei der Untersuchung der Einzelprozesse; zum Teil sind es unmittelbare Fortsetzungen der im letzten Jahresbericht geschilderten Untersuchungen.

Die einzelnen Ergebnisse werden unten geschildert. Hier sei schon auf einige Punkte hingewiesen:

Die Messungen zur Rückstreuung von Wasserstoff bei Primärenergien unter 15 keV wurden weitergeführt und u. a. totale Rückstreukoeffizienten ermittelt.

Die Erosion bei Wasserstoff- und Heliumbeschuß unter 15 keV wurde untersucht an Edelstahl sowie Messungen an Graphit und Siliziumkarbid wegen deren möglicher Bedeutung für JET begonnen. Dabei zeigte sich, daß im bisher untersuchten Parameterbereich keine über die Zerstäubung hinausgehende Abtragung auftritt, wie sie als Folge des Blistering befürchtet wurde. Diese Ergebnisse werden gestützt durch weitere Untersuchungen zum Blistering. Es zeigt sich nämlich, daß bei He-Beschuß unter 15 keV das Blistering nur ein Anlaufeffekt ist, der bei fortgesetztem Beschuß wieder verschwindet.

Bei niederen Energien (< 2 keV) wurden Messungen zur Desorption durch Ionenbeschuß, zunächst an S adsorbiert auf Ni als Modellsubstanz begonnen.

Mit der Ionenmikrostrahlsonde konnten u. a. Untersuchungen zur Tiefenauflösung bei der Messung von Konzentrationsprofilen durchgeführt werden.

Die Methode der quantitativen AUGER-Analyse wurde weiter verbessert. Der dynamische Bereich konnte bis auf einen Faktor von 10^3 ausgedehnt werden. Dies ist für die Untersuchung technischer Oberflächen von großer Bedeutung.

1. ÜBERLEGUNGEN ZUR PLASMA-WAND-WECHSELWIRKUNG

(R. Behrisch, D. Düchs, G. Haas¹⁾, D. Pfirsch, H. Vernickel²⁾)

Das im letzten Jahr beschriebene einfache Modell zur Abschätzung des Verunreinigungszustromes von Düchs, Haas, Pfirsch und Vernickel wurde weiter behandelt / 163 /. Über die bereits referierten Ergebnisse hinaus wurde untersucht, ob unter der Annahme endlicher Einschlußzeiten der Verunreinigung stationärer Betrieb eines Reaktors möglich ist. Man findet, daß unter optimistischen Voraussetzungen die Einschlußzeit der Verunreinigungen das zehn- bis hundertfache der Teilcheneinschlußzeit des Brennstoffs betragen kann / 64 /.

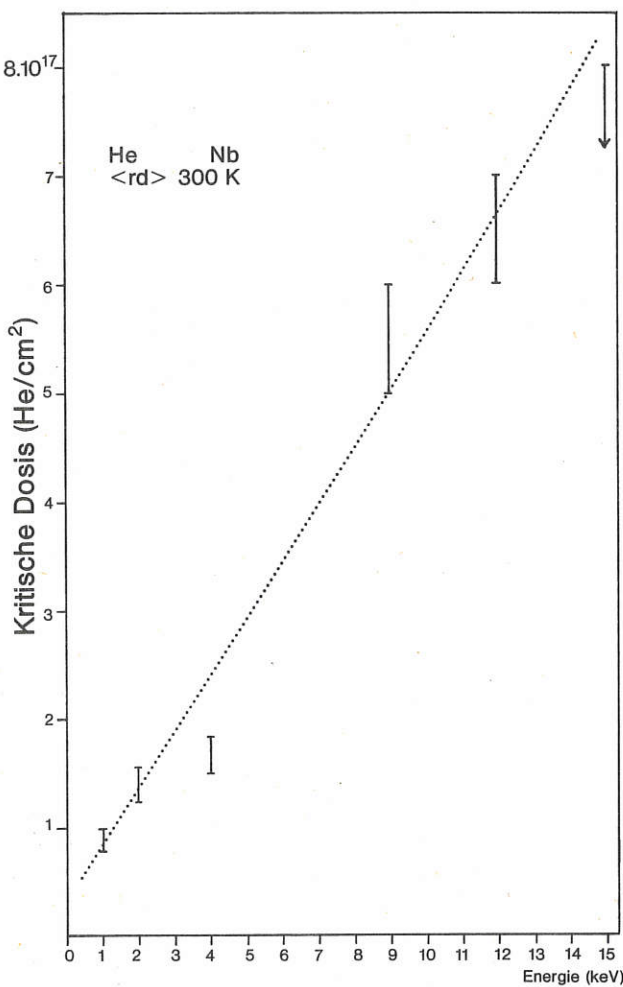


Abb. 1: Abhängigkeit der kritischen Dosis für Blisterbildung sowie der Deckeldicken und Blisterdurchmesser von der Energie bei Beschuß von Nb mit He⁺.

1) Bereich TOKAMAK

2) z. T. in Zusammenarbeit mit Acad. B. B. Kadomtsev, Kurchatov Inst., Moskau

3) Seit September 1974

4) Aufnahme der REM-Bilder durch Fa. Klingele, München

Abschätzungen des Wandbeschusses unter Einschluß der Neutralteilchenzufuhr und von Divertoren von Behrisch und Kadomtsev / 26, 27 / ergaben eine Wandbelastung von 5 bis 100 W/cm² und Teilchenflüsse von 10¹⁴ bis 10¹⁶ Wasserstoffionen/cm². Der Wandbeschuß mit Wasserstoff läßt sich durch Einbau eines Divertors voraussichtlich nicht drastisch herabsetzen, der Divertor scheint jedoch zur Abführung des He und der Verunreinigungen wesentlich zu sein, falls sie sich nicht auf der Achse ansammeln, in welchem Fall ohnedies nur gepulster Betrieb möglich ist.

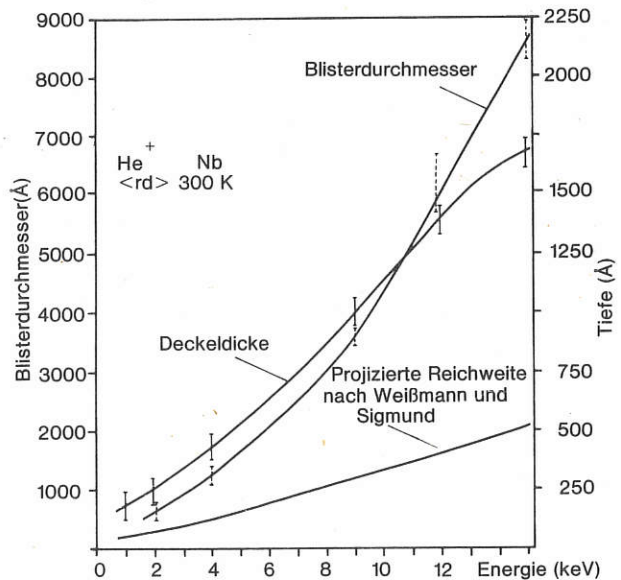
2. PHARAO, BOMBARDINO, 2,5 MeV-BESCHLEUNIGER

(R. Behrisch, R. Heilmeyer, M. Risch³⁾, J. Roth, B. M. U. Scherzer, H. Schmidl, H. Wacker)

2.1 Blistering

Die im Jahresbericht 1973 beschriebenen Untersuchungen zum Blistering bei He⁺-Beschuß von Nb wurde zu höheren Energien hin ausgedehnt. Die Bestrahlungen erfolgten in der Apparatur BOMBARDINO, die in-situ Analyse wurde mit dem 2,5 MeV-Beschleuniger durch Rutherford-Rückstreuung durchgeführt. Außerdem wurden die beschossenen Proben im Rasterelektronenmikroskop untersucht⁴⁾. Blistergröße, Deckeldicke und kritische Dosis nehmen mit der Beschußenergie zu. Ab etwa 10 keV beginnen die Deckel abzuplatzen. Einige Ergebnisse sind in Abb. 1 und 2 wiedergegeben. Die älteren Messungen wurden bezüglich der Schädigungsprofile, der Tiefenverteilung des He und der He-Diffusion weiter ausgewertet und publiziert / 172-176 /.

Um weiterhin die Änderung der Blisterbildung mit zunehmender Ionendosis zu untersuchen, wurden Nb-Targets mit bis zum 2000fachen der kritischen Dosis für das erste Auf-



4 keV

9 keV

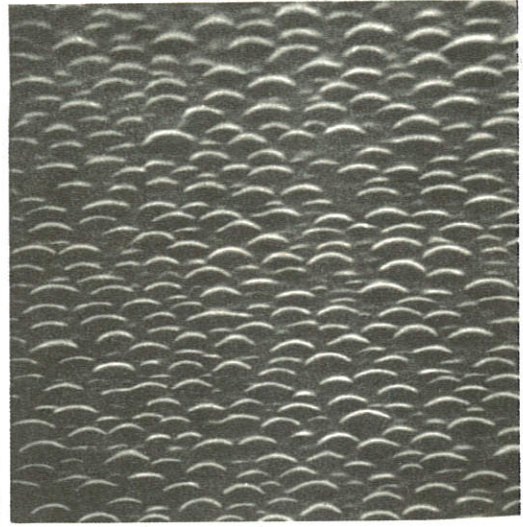
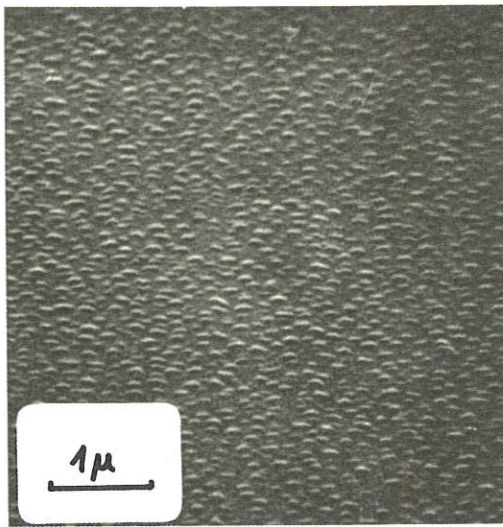
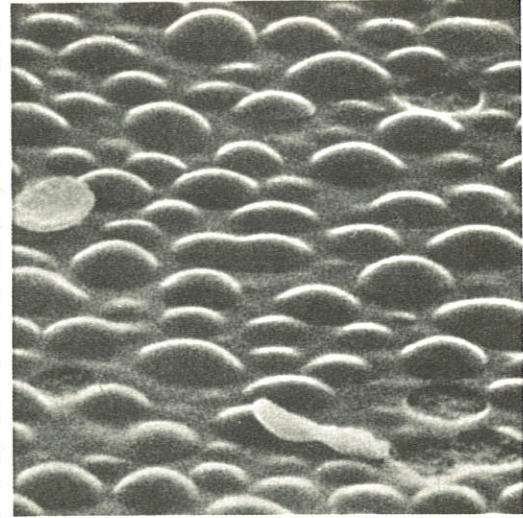
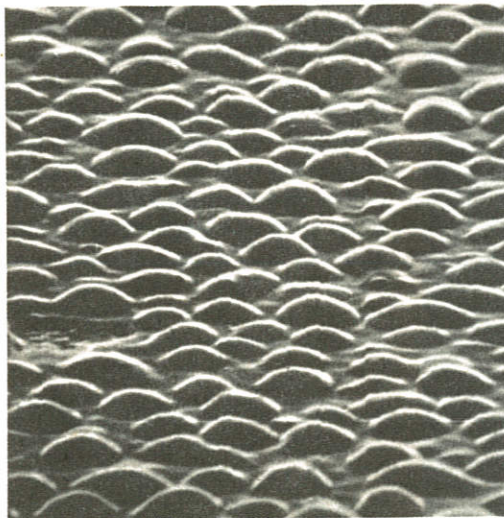


Abb. 2: REM-Aufnahmen von Blisters auf Niob nach He^+ -Beschluß verschiedener Energie.



12 keV

15 keV

treten der Blisters beschossen. Dieser Beschuß wurde zum Teil in der Hochstromionenquelle ausgeführt. Es ergab sich, daß bei den niedrigen Energien unter 15 keV keine zweite Generation von Blisters auftritt. Die Blister auf der Oberfläche verschwinden, nachdem eine Oberflächenschicht entsprechend der Deckeldicke durch Zerstäubung abgetragen wurde. Die Oberflächen zeigen schließlich eine starke Erosionsstruktur mit Furchen und Hügeln, deren Einzelheiten von der Orientierung der Kristallite abhängen (Abb. 3). Das Verschwinden der Blisters beruht vermutlich auf der unterschiedlichen Schädigungsverteilung in der Oberfläche, einmal nach Beschuß mit relativ niedrigen Ionendosen zur Erzeugung der ersten Blister und zum anderen nach Beschuß mit wesentlich höheren Ionendosen.

Die durch die hohen Ionendosen erzeugte Schädigungsverteilung wurde daher so simuliert, daß auf eine ausgeheilte Nb-Oberfläche zuerst He -Ionen mit Energien von 0,5, 1, 2, 4 und 6 keV mit für Blisterbildung unterkritischer Dosis aufgeschossen wurden, bevor dann mit 9 keV eine für Blisterbildung ausreichende Dosis aufgeschossen wurde. In diesem Fall konnte praktisch keine Blisterbildung beobachtet werden.

Diese Ergebnisse lassen sich für einen Fusionsreaktor so extrapolieren, daß bei dort auftretendem Wandbeschuß mit kontinuierlicher Energieverteilung die Blisterbildung auf der Wand wesentlich kleiner ist, als heute bei Ionenbeschuß-Experimenten mit nur einer Energie und kleiner Dosis beobachtet wird.

(Abb. 3 siehe nächste Seite!)

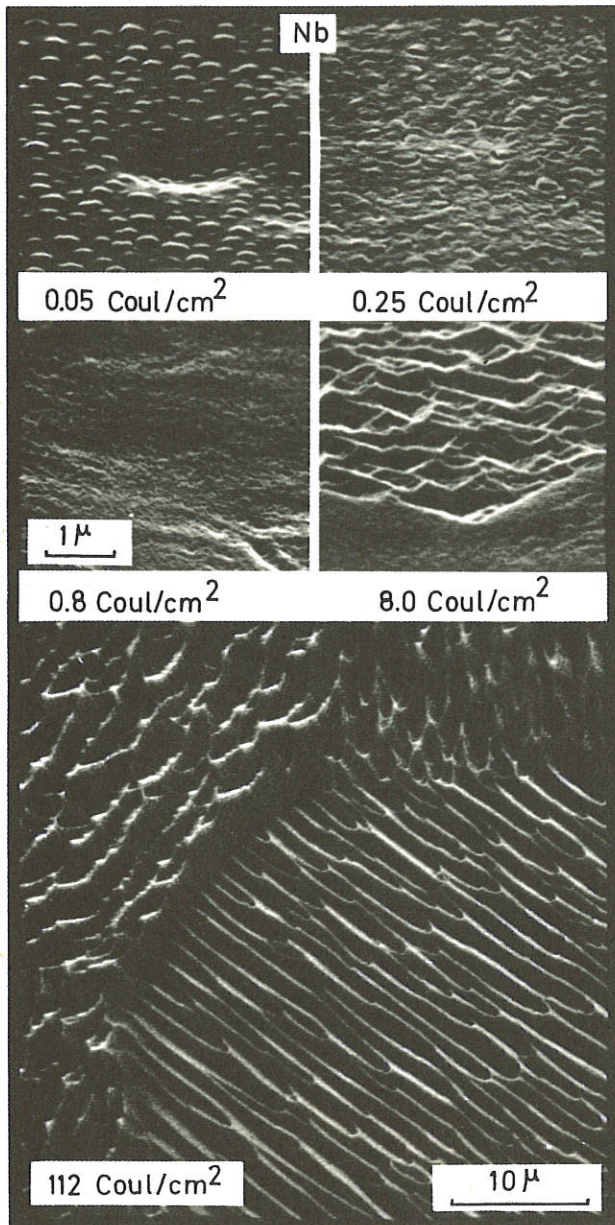


Abb. 3: Oberflächenstruktur von polykristallinem Niob nach Ionenbeschuss (9 keV He^+) bei verschiedenen Beschussdosen. Bei kleiner Beschussdosis ($0,05 \text{ C/cm}^2$) tritt Blisterbildung auf, die mit zunehmender Dosis verschwindet. Körner verschiedener Orientierung zeigen dann unterschiedliche Erosionsstruktur.

2.2 Zerstäubungsmessungen an dünnen Edelstahl- und Kohlenstoff-Filmen

(R. Behrisch, H. Kukral, B. M. U. Scherzer, H. Schmidl, H. v. Seefeld¹⁾, H. Wacker)

Zur Ergänzung der Messungen an der Hochstromionenquelle (s. u.) wurden Zerstäubungsmessungen an dünnen Filmen, die auf Be aufgestäubt (Edelstahl) bzw. aufgedampft (Kohlenstoff) waren, durchgeführt. Die Dickenabnahme der Filme wurde in situ durch Rutherford-Rückstreuung von $2,5 \text{ MeV He}^+$ bestimmt. Der Beschuss erfolgte mit D^+ , D_2^+ und D_3^+ Ionen mit Energien von 1 bis 15 keV . Die Zerstäubungsausbeuten stimmen innerhalb eines Faktors 2 mit den an der Hochstromquelle gemessenen überein; sie liegen im Zerstäubungsmaximum bei ca. 10^{-2} Atomen/Ion für Edelstahl und 4×10^{-2} Atomen/Ion für Kohlenstoff.

2.3 Zweites Zerstäubungsexperiment mit 14 MeV -Neutronen

(R. Behrisch, R. Gähler, R. Heilmeyer, J. Kalus²⁾)

Bei diesem Experiment konnte die erreichte Neutronendosis um den Faktor 5 auf ca. $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ gesteigert werden. Die schon im ersten Versuch an Au gemessenen Ausbeuten von $< 10^{-4}$ Atome/Neutronen wurden bestätigt. Es ergab sich für die Vorwärtszerstäubungen sogar nur ein Wert von $1,6 \times 10^{-5}$ Atome/Neutron, der noch besser mit den theoretischen Erwartungen übereinstimmt. Eine mögliche Ursache für den höheren Wert beim ersten Versuch ist, daß dort noch nicht sauber genug gearbeitet wurde, d. h., daß Reste von Goldstaub vorhanden waren. Die Ausbeuten von Rückstoßatomen über $(n, 2n)$ Prozesse waren bei beiden Versuchen etwa gleich und lagen bis 10^{-7} in Vorwärts- und 10^{-9} in Rückwärtsrichtung. Diese konnten bei neueren Messungen in den USA bestätigt werden.

3. RECHNUNGEN ÜBER REICHWEITEN UND SCHÄDIGUNGSVERTEILUNG BEIM BESCHUSS VON METALLEN MIT LEICHTEN IONEN

(R. Behrisch, U. Littmark³⁾, G. Maderlechner, B. M. U. Scherzer⁴⁾)

Für das Verständnis der Blisterbildung und die Planung weiterer Messungen sind die folgenden Rechnungen durchgeführt worden:

- Es wurde begonnen, die in der Literatur bekannten analytischen Ansätze für die Reichweiteverteilung nach der Boltzmannschen Transportgleichung für die uns interessierenden Fälle genauer zu berechnen.
- Mit dem bei ORNL entwickelten Computer-Programm MARLOWE wurden Reichweite und Schädigungsverteilungen bestimmt. Die ersten Ergebnisse zeigen, daß die Verteilungen sehr stark von dem differentiellen Energieverlust der Ionen in Gittern sowie der Ordnung im Gitter abhängen. Durch einen Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Verteilungen sollten Aussagen über den differentiellen Energieverlust der Ionen im Gitter zu gewinnen sein.

¹⁾ Seit September 1974

²⁾ Technische Universität München

³⁾ Universität Kopenhagen, seit Oktober 1974 Gast im IPP

⁴⁾ In Zusammenarbeit mit M. T. Robinson, Solid State Division ORNL/USA

4. BOMBARDON

(W. Eckstein, R. Hippele, P. Matschke, P. Meischner¹⁾, S. Schrapel, H. Verbeek²⁾)

Im Jahre 1973 wurde u. a. der Bruchteil der geladen von Nb zurückgestreuten Protonen (N^-/N_{ges}) als Funktion von Austrittswinkel und -energie bestimmt. Jetzt wurden ausführlichere Messungen der geladenen Zurückgestreuten für Primärenergien zwischen 3 und 15 keV durchgeführt und daraus mit den gewonnenen Daten Energie- und Winkelverteilung der insgesamt zurückgestreuten Teilchen und absolute Rückstreuoeffizienten bestimmt. Für den untersuchten Primärenergiebereich ist die Winkelverteilung in guter Näherung eine \cos -Verteilung. Lediglich die wenigen mit den höchsten Energien rückgestreuten Teilchen werden bevorzugt in Vorwärtsrichtung gestreut. Die Energieverteilung der in den gesamten Halbraum zurückgestreuten Teilchen hat ein Maximum bei etwa 1 keV. Die Rückstreuoeffizienten liegen merklich niedriger, als theoretisch erwartet wurde. Dies könnte an *channeling*-Effekten oder an den auf Nb meist vorhandenen Oxydationsschichten liegen. Um diese Messungen zu kleineren Energien ausdehnen zu können, wurde der vorhandene Neutralteilchendetektor in einer eigens dazu aufgebauten Apparatur bis zu Energien von 150 eV geeicht.

Zum Teil gemeinsam mit S. Datz (Oak Ridge, National Lab., USA) wurden die Energieverteilungen der negativen

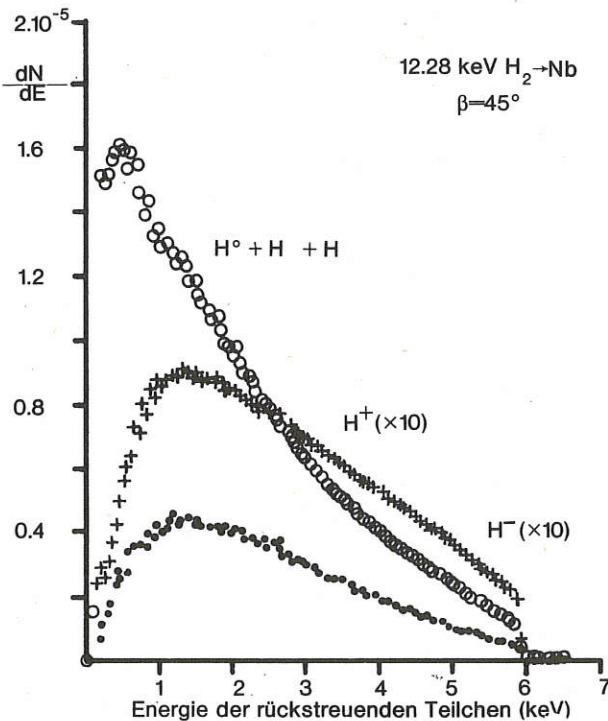


Abb. 4: Energieverteilung des von Nb zurückgestreuten Wasserstoffs bei senkrechtem Beschuss mit H_2^+ von 12,28 keV und Beobachtungen unter 45° . $\frac{dN}{dE}$ gibt die Zahl der Teilchen pro Energieintervall von 53 eV und in ein Ringelement (d. h. integriert über den Azimut) der Öffnung Ω .

¹⁾ bis 31. Mai 1974

²⁾ seit 1. Oktober 1974 für ein Jahr nach Oak Ridge beurlaubt

³⁾ ($\frac{N^-}{N^+} > 1$ für Rückstreuenergien < 5 keV für $H \rightarrow Au$)

und positiven rückgestreuten Wasserstoffionen für Beschleunigungsenergien zwischen 5 und 15 keV gemessen. Als Targetmaterialien wurden Ta, Nb, thoriertes Iridium und Gold untersucht. Das Verhältnis N^-/N^+ von negativen zu positiven rückgestreuten Ionen ist für die früher untersuchten Materialien wie Nb kleiner 1 (Abb. 4), während für Gold (saubere Oberfläche) und auch für thoriertes Iridium z. T. mehr negative als positive Ionen gefunden werden³⁾. Außerdem wurde festgestellt, daß das Verhältnis N^-/N^+ von der Art der primären Molekülonen (H^+ , H_2^+ , H_3^+) abhängt und zwar in der Art, daß das Verhältnis N^- für das komplizierte Molekül am größten ist. Weiterhin konnte gezeigt werden, daß N^-/N^+ im wesentlichen eine Funktion der Geschwindigkeit ist. Rückgestreute Wasserstoffmolekülonen konnten für kleine Streuwinkel beobachtet werden.

Ab August wurden die Messungen unterbrochen, da die Apparatur in die Halle L 4 umgesetzt und an den 2,5 MeV-Beschleuniger angeschlossen wurde. Dabei wurde die Anlage in verschiedenen Teilen verbessert.

5. SORBAS

(W. Heiland, Fr. Ch. Fritsch, H. Hupfloher, F. Iberl, F. Schuster, E. Taglauer)

Beim Beschuss von Metalloberflächen mit Ionen wird Rückstreuung der Ionen und Zerstäubung der Oberfläche einschließlich adsorbierter Fremdatome beobachtet. Die Messungen der Ionenrückstreuung und der ioneninduzierten Desorption werden zum Verständnis der Wandeffekte benötigt, wie sie beim „recycling“ und „Pulse-cleaning“ auftreten. Zunächst wurden Desorptionsmessungen an solchen Metall-Adsorbat-Systemen durchgeführt, deren Eigenschaften durch vorhergehende Untersuchungen bekannt waren. Im Experiment SORBAS kann dieser Desorptionsvorgang dadurch quantitativ erfaßt werden, daß die Oberflächenkonzentration während des Ionenbeschusses gemessen wird. Ergebnisse für geringe Schwefelbedeckungen auf einer sauberen Nickel-Fläche zeigt Abb. 5. Für Ne-Ionen verschiedener Primärenergie wird jeweils eine exponentielle Abnahme

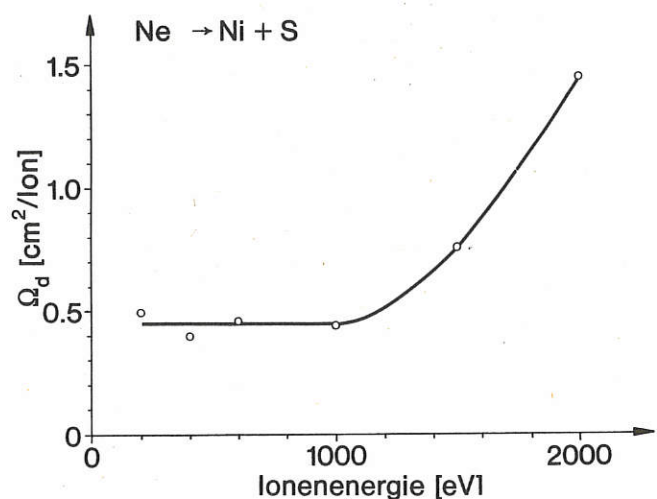


Abb. 5: Wirkungsquerschnitt für die Desorption von S adsorbiert auf Ni (111) bei Beschuss mit Neonionen mit Energien von 200 bis 2000 eV.

der Oberflächenkonzentration mit zunehmendem Beschuß beobachtet. Aus den Steigungen der Geraden kann der Desorptionswirkungsquerschnitt δ_d (cm^2/Ion) ermittelt werden.

Diese Messungen wurden mit Hilfe des neu installierten Massenseparators durchgeführt, der insbesondere auch einen raschen Wechsel zwischen verschiedenen Primärionenarten erlaubt. Im Berichtsjahre wurden Vergleichsmessungen zwischen He^+ - und Ne^+ -Ionen durchgeführt, und zwar in Zusammenhang mit der experimentell beobachteten relativ starken Rückstreuintensität von Ne^+ - von adsorbiertem Schwefel. Dieser Effekt kann nicht durch die bekannten Rückstreuwirkungsquerschnitte erklärt werden, sondern ist auf Besonderheit der Neutralisation an Oberflächen zurückzuführen. Der Einfluß anderer Verunreinigungen oder unterschiedlicher Schwefelkonzentration konnte durch in situ AUGER-Elektronenspektroskopie ausgeschlossen werden.

Weitere Messungen zur Adsorption und Ionenstreuung wurden am System Silber-Sauerstoff (im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 128) aufgenommen. Als erstes Ergebnis konnte die Position des adsorbierten Sauerstoffs auf der Oberfläche innerhalb gewisser Grenzen bestimmt werden. Die früher beschriebenen Untersuchungen (siehe Jahresbericht 1973) zur Bestimmung der Wechselwirkungspotentiale wurde für Ne^+ -Streuung an einkristallinen Silberoberflächen weitergeführt. Diese Messungen können nur durch den Vergleich mit numerischen Modellrechnungen ausgewertet werden. In Erweiterung der bisher benutzten eindimensionalen Modelle wurden erste Rechnungen mit dem dreidimensionalen Modell MARLOWE¹⁾ durchgeführt. Wegen des hohen Anteils neutraler Atome im Rückstreupektrum wurden Untersuchungen zum Nachweis langsamer Neutralteilchen (ca. 20 eV bis 100 eV) aufgenommen. Die Ionisation durch Elektronenstoß führte in diesem Energiebereich zu experimentellen Schwierigkeiten, weshalb auch andere Methoden erprobt werden.

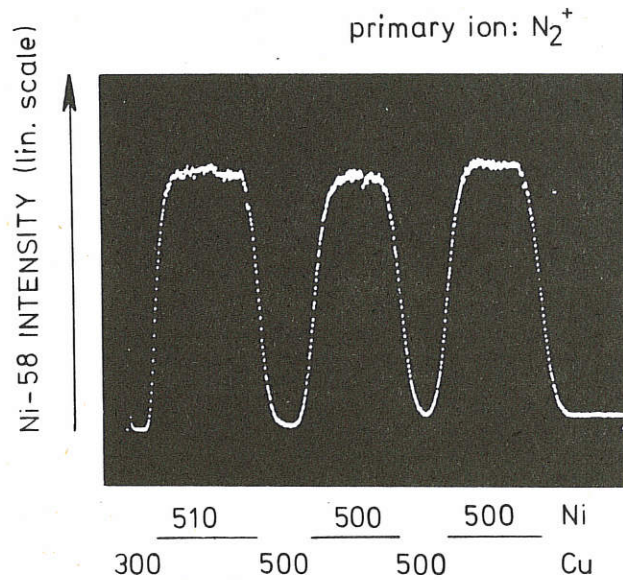


Abb. 6: Tiefenprofil des Ni von einer Cu-Ni-Sandwich-Probe (die Zahlen bedeuten Tiefe in Å).

¹⁾ M. T. Robinson, I. M. Torrens, Phys. Rev. **B9**, 5008 (1974).

²⁾ Bis 15. Oktober 1974 für einen Aufenthalt an der Universität Aarhus, Dänemark, beurlaubt

³⁾ Als Gastforscher

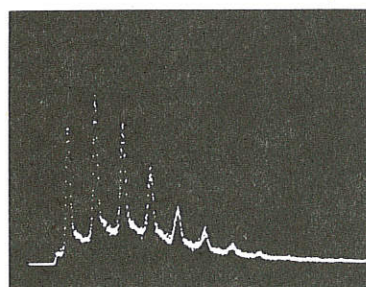
6. IONENMIKROSTRAHLSONDEN

(W. Daser, W. Hofer²⁾, H. Liebl, H. Kukral, A. Schlamp, G. Staudenmaier³⁾)

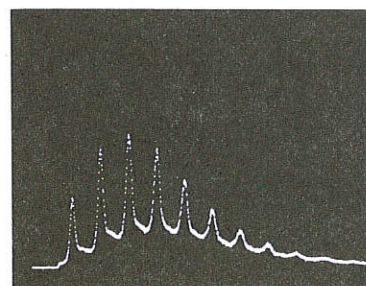
F.-Programm:

Anhand von aufgedampften Sandwichproben wurde das Erosionsverhalten verschiedener Systeme bei Zerstäubung durch Ar^+ - und N_2^+ -Ionenbeschuß untersucht. Die Ionenfluenz wurde mittels Strahlrasterung homogenisiert. Es können Tiefenprofile von Probenstellen mit nur wenigen μm Abmessungen mit einer Tiefenauflösung von optimal etwa 100 Å aufgenommen werden. Dabei wird der Einfluß des Kraterandes, der bei abnehmender Konzentration stark stören würde, durch eine „elektronische Apertur“ ausgeschaltet.

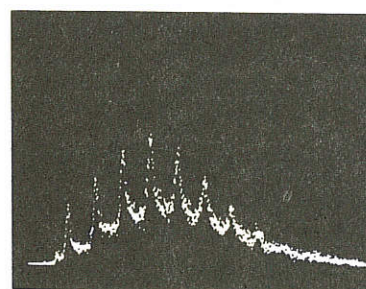
Im Zuge dieser Untersuchungen wurden die Zerstäubungsausbeuten mehrerer Metalle bei Beschuß mit Ar^+ - und N_2^+ -Ionen von 11 keV Energie bestimmt. (Abb. 6 und 7)



$$\bar{\gamma} = 2,6$$



$$\bar{\gamma} = 3,6$$



$$\bar{\gamma} = 4,9$$

Abb. 7: Pulshöhenverteilungen der Sekundärelektronen, erzeugt durch verschiedene Ionen mit 15 keV Energie an einer V2A-Fläche.

Im Hinblick auf den quantitativen Sekundärionennachweis wurden an einem Kugelkonverter-Detektor Sekundärelektronenausbeuten für verschiedene Atom-, Molekül- und Clusterionen gemessen.

E.-Programm:

In Zusammenarbeit mit der Projektgruppe Datenerfassung wurde die Installation eines PDP 11-Rechners zur Prozeßsteuerung und Meßdatenerfassung begonnen.

Der Betrieb einer Duoplasmatronquelle mit Hohlkathode – erforderlich für reaktive Gase – wurde untersucht.

Für die zweite Mikrosondenapparatur (COALA) wurde die Konstruktion noch fehlender und der Zusammenbau schon gefertigter Teile weitergeführt.

7. ESCA

(M. Hunger, J. Kirschner, P. Staib, J. Zinser)

7.1 Oberflächenuntersuchungen am PULSATOR-Limiter

Es wurden eine Reihe von Messungen zur Analyse von PULSATOR-Limitern durchgeführt. Als Untersuchungsmethoden wurden Quantitative-Auger-Elektronen-Spektroskopie (QAES) und Sekundär-Ionen-Massen-Spektroskopie (SIMS) benutzt. Zusätzlich wurden Bilder der untersuchten Oberflächen mit Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgenommen, wobei auch Röntgen-Mikroanalyse (RMA) möglich war. Die Analysen zeigen, daß die Teile des Limiters, die im Kontakt mit dem Plasma stehen, sauber geblieben sind. Andere Teile zeigen dagegen eine Fläche fast vollständig bedeckt mit einer Schicht aus Fe, Cr, Ni, die darüber hinaus stark oxidiert ist. Außerdem wird eine Reihe weiterer Verunreinigungen wie C, Ca, N, Na, K, nachgewiesen. Die Belegung auf der „Elektronenseite“ ist wesentlich stärker als die von der „Ionenseite“. Dies zeigt, daß die *run-away*-Elektronen für die Verdampfung und Zerstörung der Wand verantwortlich sind.

7.2 Elektronen-induzierte Desorption von Sauerstoff auf W. Mittels einer kombinierten SIMS/AES-Apparatur wird die elektronen-induzierte Desorption von O auf polykristallinem Wolfram untersucht. Der Oberflächenzustand der Probe wird mit Augerspektroskopie bestimmt, während desorbierte Ionen mit einem kombinierten Energie- und Massenfilter analysiert werden. Beide Signale können simultan registriert werden. Ergebnisse werden berichtet für die Änderung der Energieverteilung der desorbierten Ionen mit der Primärenergie, für den Verlauf der Gesamtionenausbeute über der Primärenergie und für die Temperaturabhängigkeit von Bedeckung und Ionensignal bei niedrigen Sauerstoff-Partialdrücken.

7.3 Empfindliche AUGER-Elektronen-Spektroskopie

(P. Staib, M. Walter, R. Hesse, U. Littmark)

Wird ein gemessenes AUGER-Spektrum $dN(E)/dE$ integriert, um die $N(E)$ -Verteilung der Sekundärelektronen zu gewinnen, so beobachtet man ein starkes Anwachsen des Signal-Rausch-Verhältnisses. Nach der Subtraktion des Untergrundes erhält man – neben den stärkeren Augerlinien – zahlreiche schwache Linien, die z. T. als Augerlinien interpretiert werden können. Man erreicht mit einem gewöhnlichen Gegenfeldspektrometer einen dynamischen Bereich von 10^3 ,

d. h. das Verhältnis zwischen den stärksten und schwächsten Augerlinien eines Spektrums ist Tausend. Mit einem dispersiven Spektrometer wird eine weitere Erhöhung erzielt.

8. HOCHSTROMIONENQUELLE

(R. Behrisch, J. Bohdanský¹⁾, W. J. Graf, G. Oetjen²⁾, W. Ott³⁾, W. Ottenberger, F. Probst³⁾, J. Roth, G. Schilling³⁾, E. Speth³⁾, H. Verbeek)

Zur Simulation des erwarteten hohen Beschusses der ersten Wand und der Divertorplatten in geplanten und laufenden Plasmaexperimenten wurden Untersuchungen mit der Duoplasmatron-Ionenquelle, die für den Neutralteilcheneinschuß am W VII entwickelt wurde, ausgeführt. Der Ionenstrom wurde auf ca. 1 cm ϕ ausgeblendet und magnetisch analysiert. Man erhielt dann Teilchenflußdichten bis zu $1,5 \times 10^{16} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($2,4 \text{ mA/cm}^2$) im Energiebereich von 6–20 keV. Für Untersuchungen mit Energien unter 4 keV konnte der Strahl durch ein Gegenfeld am Target abgebremst werden.

Bei Messungen wurde die Gewichtsänderung der Probe mit einer Mikrowaage (Mettler M 5 und ME 22) bestimmt. Daraus ergibt sich die totale Erosionsausbeute (Zerstäubung und Blistering) oder auch die Menge des aufgesammelten Gases. Weiterhin wurden die beschossenen Oberflächen im Rasterelektronenmikroskop⁴⁾ beobachtet. Die ausgeführten Untersuchungen stehen im Zusammenhang mit konkreten Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Projekte JET, ASDEX und HBS.

a) Zerstäubung

Zerstäubungsmessungen wurden durchgeführt an Edelstahl (304), Niob, verschiedenen Graphiten und Kohlenstoff sowie an Quarz. Die Meßergebnisse sind in der Tabelle (auf der nächsten Seite) angeführt.

b) Gas aufzehrung

Meßergebnisse zur Gas aufzehrung von Wasserstoff in Zirkon sind in Abb. 8 angegeben. Sie sind mit berechneten Werten des Reflexionskoeffizienten verglichen⁵⁾. Die gute Übereinstimmung läßt den Schluß zu, daß im wesentlichen alle in das Material eingedrungenen Teilchen auch darin zurückgehalten werden. Gas aufzehrung wurde auch an kommerziellen Gittermaterialien (St 101 der Firma SAES) durchgeführt. Wegen der übersichtlicheren mechanischen und thermischen Eigenschaften bei gleichzeitig guter Gas aufzehrung wurde reines Zr als Material für die ASDEX-Divertorplatten vorgeschlagen.

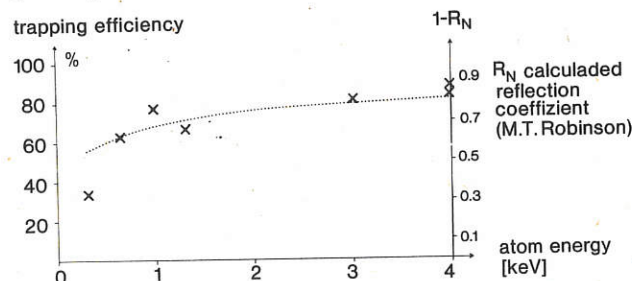


Abb. 8: Gemessene Gas aufzehrung in Prozent des eingeschlossenen Wasserstoffs (X), verglichen mit berechnetem Reflexionskoeffizienten (—).

¹⁾ Gast von CCR EURATOM, Ispra

²⁾ Bis 31. Juli 1974

³⁾ Bereich Niedrig-Beta-Stellaratoren

⁴⁾ Fa. H. Klingele, München

⁵⁾ M. T. Robinson, Proceedings 3rd National Conference Atomic Coll. in Solids, Kiew, UdSSR, Oktober 1974

Tab.: Erosionsausbeuten verschiedener Materialien bei Beschuß mit Wasserstoff- und Heliumionen.

Material	Ions	Energy [keV]	S		Number of experiments
			(atoms ions)		
SS 304		7,5	$5,9 \pm 1 \times 10^{-3}$	8	
	H (H ₂)	5	$7,3 \pm 1 \times 10^{-3}$	8	
		3	$7,6 \pm 3 \times 10^{-3}$	4	
	H (H ₃)	3	$8,86 \times 10^{-3}$	1	
	H (H ₂)	2	$5,9 \times 10^{-3}$	1	
	H (H ₃)	2	$10 \pm 1 \times 10^{-3}$	4	
	H (H ₂)	0,5	$3,2 \pm 0,5 \times 10^{-3}$	2	
	H (H ₃)	0,5	$3,6 \times 10^{-3}$	1	
Nb	He ⁺	9	$5,9 \pm 2 \times 10^{-2}$	2	
pyrolytic graphite	H (H ₂)	7,5	$1,5 \pm 0,3 \times 10^{-2}$	2	
		3	$2,4 \times 10^{-2}$	1	
glassy carbon	H (H ₂)	3	$1,4 \times 10^{-2}$	1	
graphite fibers	H (H ₂)	3	$2,6 \times 10^{-2}$	1	
pyrolytic graphite	He	6	$1,8 \times 10^{-1}$	1	
SiC (Refel)	H (H ₂)	7,5	$7 \pm 0,9 \times 10^{-3}$	4	
		5	9×10^{-3}	1	
SiO ₂	H (H ₂)	2,5	$< 3 \times 10^{-3}$	1	

c) Aufbau einer neuen Ionenquelle

Da die vorläufig verwendete Injektionsquelle für W VII voll für das Einschußprojekt benötigt wird, wurde gegen Ende des Berichtszeitraumes zusammen mit W. Ott eine weitere Hochstromionenquelle aufgebaut; sie wird ganz für Wanderosionsmessungen zur Verfügung stehen.

9. EXPERIMENT QWAASS

(M. Roppelt, F. Staib)

In Zusammenarbeit mit der Firma Riber wurden die endgültigen Fertigungspläne erstellt. Die Apparatur wurde im Dezember geliefert und gleich an PULSATOR angebaut.

10. FELDEMISSION SPINPOLARISIERTER ELEKTRONEN¹⁾

(W. Eckstein, K. Ertl, J. W. Graf, N. Müller)

Die Apparatur zur Erzeugung spinpolarisierter Elektronen wurde durch Einsatz eines neuen Pumpsystems im Polarisationsdetektor vakuummäßig verbessert. Drucke von besser als 4×10^{-11} Torr wurden im Emissionsteil erreicht. Die Verwendung von EuS-Kristallen zum Aufdampfen und eines verbesserten Verdampfungsöfens beseitigte die Schwierigkeiten mit Verunreinigungszuständen nicht, und die Emission über 4 f-Zustände konnte nicht in Reinkultur erhalten werden.

Der Aufbau der Apparatur zur Messung der Energieverteilung von feldemittierten Elektronen wurde weitgehend abgeschlossen. Die schnelle Elektronik zur Datenerfassung wurde installiert. Das Vakuumsystem (mit Einbauten) ist getestet, und ein Druck von 2×10^{-11} Torr wurde erreicht. Erste Feldemissionsbilder konnten gesichtet werden.

¹⁾ Untersuchungen im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 5/128

Bereich Informatik

(Prof. Dr. Friedrich Hertweck)

Im Bereich INFORMATIK werden folgende Aktivitäten zusammengefaßt: der Betrieb der Großrechenanlage IBM 360/91 - 370/145, die Entwicklung des Betriebssystems AMOS und das Projekt „Datenerfassung“.

Die Rechenanlage wurde im Jahre 1974 mit fast vier Schichten (24 Std./Tag, 7 Tage/Woche) betrieben (Gesamtbetriebszeit: 6890 Std.). Es wurden 5103 Std. CPU-Zeit abgerechnet. Davon hatte das IPP einen Anteil von 37,6%. Normiert auf die echte Laufzeit von 6405 Std. (d. h. ohne Wartezeiten und durch Systemfehler verlorene Zeiten) ergab sich eine mittlere CPU-Auslastung von 79,6%. Die Systemverfügbarkeit betrug 95%. Im Bereich des Betriebssystems (OS/360-MVT) wurde im wesentlichen das HASP weiterentwickelt, insbesondere im Bereich Operator/Maschine - Interface. Einen breiten Raum nahm ferner die Redaktion der Neuauflage des IPP-Programmierer-Handbuchs ein. Die Rechenanlage wurde ab Mai 1974 als Verbundsystem betrieben, wobei das AMOS auf die 145 verlagert wurde.

Das AMOS-Betriebssystem wurde einen wesentlichen Schritt weiterentwickelt. Ursprünglich als OS/360 Job für die 91 konzipiert, wurde das AMOS durch Unterbrechungsbehandlungsroutinen und E/A-Geräte-Treiberrountinen zu einem „echten“ Betriebssystem erweitert. (Task Management und File Management existierten bereits.) Es läuft jetzt in einer „virtuellen IBM/370“ unter VM/370 auf der 145; es kann also auch in einer „leeren“ 370 laufen. Die Verlagerung des AMOS auf die 145 ermöglichte bereits bis Ende 1974 eine wesentliche Entlastung der 91 sowie die Benutzung der moderneren und preisgünstigeren Plattenspeicher.

Das Projekt „Datenerfassung“, welches als Zentralgruppe den Aufbau von Datenerfassungs- und Steuersystemen für die plasmaphysikalischen Experimente des IPP durchführt, hat während des Jahres 1974 ein experimentunabhängiges Konzept für ein Datenerfassungssystem (basierend auf Kleinrechner PDP-11) aufgebaut, wobei die Software-Entwicklung und die Entwicklung von Interfaces für den Anschluß von Diagnostiken eingeschlossen ist. Die Aktivitäten konzentrierten sich auf die Systeme für PULSATOR P I und den WENDELSTEIN W II B.

1. BETRIEB DER RECHENANLAGE

(K. H. Göhl, J. Cox, M. G. Croci, E. Fisser, W. Hüngsberg, I. Pecht, J. Schneider, K. v. Sengbusch – abgeordnet vom MPI für Astrophysik)

1.1 Betriebsstatistik

Während des Jahres 1974 war die Rechenanlage meistens mit vier Schichten ausgelastet (Mo.–Fr.: 22 Std. + 2 Std. Wartung, Sa. 24 Std., So. 9–15 Std.). Trotz Personal-

mangels konnte die Betriebszeit gegenüber 1973 leicht gesteigert werden. Lediglich an Feiertagen (Ostern und Weihnachten) war die Anlage längere Zeit abgeschaltet.

Eine Übersicht über die Betriebszeiten, Wartungszeiten, CPU-Zeiten etc. gibt Tab. 1. Der Rechenzeitverbrauch, aufgeschlüsselt nach Projekten des IPP, ist aus Tab. 2 ersichtlich. Tab. 3 liefert eine Übersicht über den Rechenzeitverbrauch und die Anzahl der gerechneten Jobs für alle die Rechenanlage des IPP benutzenden Institutionen.

Tabelle 1: Betriebsstatistik 1974

Betriebszeit	6890 : 16	6405 : 0
Laufzeit (Jobs in der Maschine)		148 : 22
Wartezeit (keine Jobs in der Maschine)		336 : 54
Verlorene Zeit (Software, Hardware)		
Wartungszeit	640 : 31	82 : 16
Betriebssystem (Dump/Restore usw.)		546 : 4
Hardware		12 : 11
Hilfsaggregate (Klima, Generatoren usw.)		
Kein Rechenbedarf	79 : 30	
Maschine abgeschaltet	1149 : 30	
Systemverfügbarkeit (BZ-VZ) /BZ	95 %	
Zusätzliche OS-Starts/Werktag	1,6	
<hr/>		
Anzahl der Jobs	307 640	
Verlorene Jobs (durch Warmstarts usw.)	1 200	
<hr/>		
CPU-Zeit	5103 : 41	
CPU-Ausnutzung	79,7 %	

Erklärung der Begriffe:

Betriebszeit	= Laufzeit + Wartezeit + Verlorene Zeit	Maschine abgeschaltet	= Zeiten, in denen (geplant) die Maschine abgeschaltet wird (Betriebsferien, kein Personal)
	= Zeit zwischen Übergabe durch Wartungstechniker an Operateure und Betriebsende (Übergabe an Techniker oder Abschalten)	Kalenderzeit	= Betriebszeit + Wartungszeit + kein Rechenbedarf + Masch. abgeschaltet
Laufzeit	= Zeit, in der mindestens ein Job im Arbeitsspeicher ist	Systemverfügbarkeit	= (Betriebszeit - Verlorene Zeit) / Betriebszeit
Wartezeit	= Zeit, in der (vorübergehend) keine Jobs vorliegen	Zusätzl. OS-Starts/Werktag	= Alle an Werktagen (normale Arbeitstage mit vollem Rechenbetrieb), zusätzl. durchgeführten OS-Starts dividiert durch die Anzahl der Werktage in einem Monat
Verlorene Zeit	= alle durch Warmstarts, Hardwarefehler (Maschine und Hilfsaggregate), Bedienungsfehler und Reparaturen verlorene Zeiten während der Betriebszeit	CPU-Zeit	= Die durch das Job-Account ausgewiesene Zeit, in der die CPU beschäftigt war (Laufzeit = CPU-Zeit + CPU-Wartezeit)
Wartungszeit	= Zeiten, in denen (geplant) Wartungsarbeiten durchgeführt werden (Maschinen, Hilfsaggregate, Dump/Restore usw.)	CPU-Ausnutzung	= CPU-Zeit/Laufzeit

1.2 Betriebssystem OS/360-MVT

Am Betriebssystem wurden verschiedene Verbesserungen vorgenommen. Dabei handelt es sich u. a. um: Einbau von Sicherungsmaßnahmen gegen unbefugtes Lesen von Magnetbändern, Bereitstellung eines Dienstprogramms zum Ausdrucken von Bandkennsätzen, Beschleunigung des Initiator/Terminators, Eingabemöglichkeit von HASP-Commands über den Konsol-Bildschirm, Reduktion der Drucker-Ausgabe beim FORTRAN-Übersetzer (Papierersparnis!), Erweiterung des Interface HASP/AMOS und Verbesserungen am HASP/OS-Scheduler.

Ende 1974 lief das OS/360-MVT in der Version 21.6. Das neuere Release 21.8, welches die nunmehr letzte OS-Version sein soll, wurde hinsichtlich Verbesserungen gegenüber Release 21.6 geprüft; sie sollen gegebenenfalls übernommen werden.

1.3 Benutzerberatung

Im Laufe des Jahres ist das IPP-Programmierer-Handbuch vervollständigt worden, so daß nun der Rechenanla-

genbenutzer alle wesentlichen Informationen in einem Handbuch vorfindet. Die weitere Arbeit am Handbuch wird sich auf kleinere Ergänzungen oder Änderungen beschränken.

Weiterhin wurde ein koordiniertes Programm von neun Programmierkursen durchgeführt. Die Themen waren: FORTRAN, Job Control Language (JCL), Benutzung der Plotter, REDUCE-System (algebraische Formelmanipulation), Benutzung von AMOS, AMOS-E/A-System, APL, Magnetband-Verarbeitung, PL 360. Die Kurse hatten im Mittel je 40 Teilnehmer.

1.4 APL

Eine neue Version des YORK-APL wurde implementiert, wonach verschiedene Systemfehler nicht mehr auftraten. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Benutzung des Systems:

Anzahl der Benutzer:	83
Betriebszeit des APL-Systems:	18 48 Std.
Summe der Sitzungszeiten:	950 Std.
Verbrauchte CPU-Zeit:	11 Std.

Es wurden öffentliche Bibliotheken mit im IPP entwickelten Prozeduren eingerichtet. Diese Bibliotheken werden laufend erweitert. Die APL-Benutzer werden durch die in zwangloser Reihenfolge erscheinenden „APL-Mitteilungen“ über alle APL-Systemänderungen informiert.

1.5 IBM/370-145 Installation

Die IBM/370-145 wurde im November 1973 installiert. Bis Mai 1974 wurde das AMOS-System auf die 145 übertragen. Dadurch konnte der Arbeitsspeicher der 91 um etwa 180 K Bytes entlastet werden. Die Kopplungs-Software zur Steuerung der Kanal/Kanal-Verbindung wurde neu konzipiert und entwickelt, da die IBM-Routinen nicht leistungsfähig genug waren.

Nach Inbetriebnahme der 145 konnte der Ausnutzungsgrad der 91 gesteigert werden, so daß die Auslastung der 91-CPU im Jahresmittel fast 80 % betrug. Weitere Funktionen (insbesondere Plotter-Ausgabe) sollen noch von der 91 auf die 145 übertragen werden.

Im 2. Halbjahr wurden die bislang verwendeten SIEMENS-Bildschirm-Terminals Transdata 8151 teilweise durch Geräte des neueren Modells 8152 (mit 81 Zeichen/Zeile) ersetzt bzw. erweitert, wodurch sich die Gesamtzahl der Bildschirme auf 47 erhöhte.

1.6 Datenerfassungssystem mit INTERDATA 70

Für die Oberflächenphysik wurde ein Datenerfassungssystem aufgebaut, das in seiner ersten Stufe Daten von Vielkanalanalysatoren übernimmt und auf ein IBM-kompatibles Magnetband überträgt. Einfache Auswertungen werden on-line ausgeführt. Dieses System ist vor allem als Prototyp für den Direktanschluß an die 360/91 bzw. 370/145 geplant.

2. AMOS-ENTWICKLUNG

(K. H. G o i h l, U. Berkl, A. Döderlein, H. Fisser)

Die Übertragung des AMOS-Terminal-Systems auf die IBM 370/145 erforderte den Aufbau eines System-Nucleus mit der Überwachung der Eingabe-/Ausgabe-Vorgänge und der Unterbrechungsbehandlung und die Entwicklung von speziellen Eingabe-/Ausgabe-Routinen für die anzuschließenden Geräte (Platte, Trommel, Kanal/Kanal-Verbindung, Bildschirm, Schreibmaschine, Konsolldrucker). An diesen Nucleus wurde – wo erforderlich – das bestehende AMOS angepaßt. Nachdem die vorhandenen Benutzerbibliotheken von den Platten der 360/91 auf die 370/145 übertragen waren, konnte das System auf der 145 im Mai in Betrieb genommen werden. Die Erweiterung des Systems mit einer Reihe von Operateur-Kommandos und der Aufbau von

Tabelle 2: Anteil der IPP-Projekte an der Rechenzeit

Institut - Kostenstelle - Kostenträger	Rechenzeit - Anteil in %	Institut - Kostenstelle - Kostenträger	Rechenzeit - Anteil in %
IPP KC Theorie	2.03.44,27 0,0	IPP 1E Stoßwellenheizung	12.08.37,20 0,2
IPP KO Sammelkostenstelle ASDEX	19.08.54,19 0,4	IPP 1G	0.38.14,31 0,0
IPP NA Entwicklung num. Verfahren	20.47.56,57 0,4	IPP 1S	68.22.35,91 1,3
IPP NB Numerische Plasmadynamik	1019.21.35,52 20,0	IPP 1T	55.16.06,18 1,1
IPP NC Reine Theorie	112.34.20,11 2,2	IPP 1X BELT-PINCH 2	107.15.23,54 2,1
IPP NO Theorie allgemein	1.45.14,98 0,0	IPP 1Y HBS II	35.03.27,17 0,7
IPP N3 Dokumentation	3.46.08,33 0,1	IPP 1O Experiment. Plasmaphys. 1 allgem.	1.58.36,24 0,0
IPP N4 Programmierungsgruppe	12.29.22,58 0,2	IPP 11 Abteilungswerkstatt	0.00.52,43 0,0
IPP RA	0.39.41,94 0,0	IPP 13 Auswerte-Gruppe	4.22.25,11 0,1
IPP RD Projekt Datenerfassung	1.21.44,78 0,0	IPP 20	0.04.41,83 0,0
IPP RO Informatik allgemein	23.25.44,95 0,5	IPP 2H STELLARATOR W IIA	0.17.16,72 0,0
IPP R1 Rechenanlage Betrieb	58.51.28,61 1,2	IPP 2K	0.05.51,64 0,0
IPP R2 Rechenanlage Systemgruppe	3.15.37,43 0,1	IPP 2P	0.00.05,83 0,0
IPP R3 AMOS-Entwicklung	2.06.31,63 0,0	IPP 2U WEGA	3.45.45,28 0,1
IPP R4 Verwaltungsprogrammierung	9.52.09,84 0,2	IPP 2W STELLARATOR W II B	0.02.42,83 0,0
IPP SB Berechnungen	19.30.46,54 0,4	IPP 2Z	20.55.34,26 0,4
IPP SE Teilchen-Einschuß	1.27.37,54 0,0	IPP 20 Experiment. Plasmaphys. 2 allgem.	0.11.59,09 0,0
IPP SK Koordinierung	0.00.45,48 0,0	IPP 3P PULSATOR 1	5.44.10,36 0,1
IPP SL Planüberwachung	1.23.35,01 0,0	IPP 3V	1.25.27,78 0,0
IPP SN Kühlung	0.44.36,87 0,0	IPP 30 Experiment. Plasmaphys. 3 allgem.	0.39.46,19 0,0
IPP SX Datenerfassung	0.00.32,59 0,0	IPP 4A Dichte Laserplasmen	28.51.19,39 0,6
IPP SY Vorexperiment für W VII	5.10.23,75 0,1	IPP 4C Jodlaser	0.36.08,04 0,0
IPP SZ Theorie	45.47.28,46 0,9	IPP 4D Chemischer Laser	51.52.20,02 1,0
IPP TQ Laser-Pellet-Quelle	0.03.25,36 0,0	IPP 4E Laser- u. Mikrowellendiagnostik	0.46.36,45 0,0
IPP TZ Reaktor-Elektrotechnik	0.00.09,40 0,0	IPP 4F Wellenrelaxation	23.09.20,98 0,5
IPP TO Technik allgemein	6.18.52,67 0,1	IPP 4W	0.31.16,94 0,0
IPP T1	6.57.51,90 0,1	IPP 40 Experiment. Plasmaphys. 4 allgem.	1.04.17,93 0,0
IPP T9	0.01.02,08 0,0	IPP 64	0.00.11,31 0,0
IPP V1 Geschäftsführung	0.14.02,71 0,0	IPP 7A	11.26.20,60 0,2
IPP V2 Verwaltung u. übr. allg. Dienste	32.03.52,62 0,6	IPP 9N	11.13.21,75 0,2
IPP ZO Allgemein u. Koordination	0.18.00,20 0,0	IPP 9Q	12.48.53,25 0,3
IPP OA Elektronenring-Beschl.-Experim.	24.31.57,99 0,5	IPP 9S	1.28.28,21 0,0
IPP 1A ISAR I	16.57.54,76 0,3	IPP 9T	0.00.36,88 0,0
IPP 1B ISAR II	2.01.41,07 0,0		
		Insgesamt im Jahre 1974	1917.13.44,38 37,6

Dienstprogrammen für die Systemwartung vervollständigten im Laufe des Berichtsjahres das AMOS-Betriebssystem, das in einer „virtuellen Maschine“ des VM/370 (eines von IBM gelieferten Steuerprogramms) in der 370/145 betrieben wird.

Weiterhin wurden neue Kommandos eingebaut, die zur Kommunikation zwischen dem Terminalbenutzer und dem Betriebssystem in der 360/91 dienen (cancel job, display jobs). Die Planung für die File Migration auf Magnetbänder wurde durchgeführt, und die Übernahme der Plottersteuerung aus der 360/91 in das AMOS-System wurde vorbereitet.

3. PROJEKT DATENERFASSUNG

(R. Lathe, F. Hofmeister, H. Krikava, E. Müller, D. Zimmermann)

Die Ziele des PDE (Projekt Datenerfassung) für 1974 waren

- Erarbeiten eines Konzepts für ein experimentunabhängiges DES (Datenerfassungssystem).
- Entwicklung der hierfür nötigen Software.
- Entwicklung sowohl speziell als auch allgemein verwendbarer Interfaces für den Anschluß von Diagnostiken an den Rechner.
- Entwicklung der zugehörigen Betriebsprogramme.

Darüberhinaus waren drei neue Anlagen zu planen und Kontakte mit anderen Instituten zu pflegen.

Da das PDE auf Grund des Berichts der Studiengruppe für Datenerfassung vom 6. 11. 1973 die Verantwortung für zwei bestehende und weitere, neu hinzukommende DES hat, war es notwendig, ein DES zu konzipieren, das experimentunabhängig, leicht zu übertragen und den jeweiligen Erfordernissen anzupassen war¹⁾.

Als Voraussetzung hierfür mußten Hard- und Software-Normen definiert werden, die in sog. PDE-Notes festgehalten wurden. Das IPP-Datenerfassungssystem (DAS) wurde nach diesen Anforderungen entwickelt. DAS setzt sich aus drei Funktionsgruppen zusammen:

- Datenerfassung und Dateiverwaltung,
- Regelung und Steuerung des Experiments,
- Verarbeitung erfaßter Daten.

Die erste Funktionsgruppe enthält einen experimentunabhängigen Datenerfassungssupervisor und Routinen für Dateiverwaltung. Weiter befinden sich darin für jede Diagnostik zwei spezielle Routinen für die Datenaufnahme. Die zweite Funktionsgruppe enthält experimentspezifische Routinen zur Überwachung und Steuerung bzw. Regelung des Experiments. Die dritte Funktionsgruppe umfaßt Routinen für die Verarbeitung von aufgenommenen Daten²⁾.

Für die Programmierung von Auswerterroutinen wurde vom PDE ein komplettes Plotpackage und ein umfassender Satz von Ein-/Ausgaberoutinen entwickelt und zur Verfügung gestellt. Für eine Auswertung von Experimentdaten auf Magnetbändern an der Großanlage IBM 360/91 wurden ebenfalls spezielle E/A-Routinen angefertigt.

Zur Aufnahme analoger Signale von Diagnostiken wurde ein CAMAC-Modul entwickelt. Den Kern des Moduls bildet

ein auf dem Markt erhältlicher Baustein, bestehend aus einem 16-Kanal-Multiplexer, einem Verstärker mit Sample und Hold, einem Analog-Digital-Wandler und der dazugehörigen Steuerlogik. Der Baustein wurde mit entsprechendem Kontrollregister und zugehöriger Alarmbehandlung an CAMAC angepaßt und ausgetestet. Dieses CAMAC-Modul wurde für WENDELSTEIN 7 entwickelt, wird aber auch zur Datenerfassung an anderen Experimenten eingesetzt. Die maximale Datenrate für einen Kanal liegt bei 100 KHz. Die Umschaltung zwischen den verschiedenen Betriebsweisen (Random-, Sequential triggered-, Sequential scan Mode) geschieht per Programm. Den Trigger erhält das Modul von einem programmierbaren Time-Sequence-Generator (Culham).

Für PULSATOR 1 wurde ein von der Fa. Digital Equipment Corporation gekaufter Bausatz (DEC-kit) zu einem E/A-Interface vervollständigt und ausgetestet. Das DEC-kit besteht aus sieben 16-bit-Eingabekanälen, einem 16-bit-Ausgabekanal und achtfacher Interruptmöglichkeit. Dieses kompakte Interface dient zur vielfachen Ein- und Ausgabe von digitalen Daten.

DAS-Soft und Hardware-Komponenten wurden an den Experimenten PULSATOR 1 und WENDELSTEIN 2b implementiert.

Das PDE erhielt im Berichtsjahre Aufträge, drei weitere DES zu planen und zu erstellen. Für die Experimente Ionen-Microprobe (IMP) und MERAM („Chemische Laser“) wurde je ein Konzept für ein DES entwickelt. Beide Rechner wurden inzwischen geliefert. Das W7-DES-Konzept konnte weitgehend fertiggestellt werden.

Der für 1975 geplante Rechnereinsatz am Experiment IMP erfordert eine schnelle Datenverbindung vom Rechner zum 26 m entfernten Interface des PHA-Speichers (Experiment FEED). Die Übertragung erfolgt bidirektional, bitparallel über symmetrische Leitungen, wobei die Datenleitungen in beiden Richtungen genützt werden.

Am Experiment MERAM liefert ein Quadrupol-Spektrometer während einiger 100 Mikro-Sekunden eine Photomultiplier-Pulsfolge bis zu 100 MHz, die zeitlich aufgelöst werden soll. Hierfür wurde ein schneller Zähler entwickelt, der während eines Intervalls von einer Mikro-Sekunde hochzählt (7-bit) und dessen Inhalt zum Intervallende in einen Pufferspeicher übertragen wird, bei gleichzeitigem Nullsetzen des Zählers. Die Totzeit während der Übertragung beträgt 20 nsec.

Im Rahmen der Zusammenarbeit im EURATOM Data Acquisition Coordinating Committee wurde die in Culham entwickelte „Language for System Development“ (LSD) implementiert. Ferner wurde unter der Aufsicht des PDE ein weiterer low-level Compiler (PL-11) entwickelt und auf seine Verwendbarkeit geprüft.

4. EDV FÜR DAS RECHNUNGSWESEN

(D. Seewald, L. Döring, E. G. Krause)

Im Berichtsjahre wurde das EDV-System erweitert mit Programmen für die Anlagenverwaltung und die Reisekostenabrechnung. Ferner wurde das Bestellobligo teilweise in

¹⁾ IPP Bericht „Concepts of the IPP Data Acquisition System“, erscheint 1975.

²⁾ Eine genaue Beschreibung der Funktionsgruppen und der darin enthaltenen Funktionen kann dem DAS-Handbuch – erhältlich beim PDE – entnommen werden.

das System integriert. Verschiedene Teilprogramme wie Druckaufbereitung, Formatumwandlung, Plausibilitätsprüfungen und Überweisungsschreibung wurden überarbeitet bzw. erweitert. Einen großen Raum nahm die Dokumentation der bereits abgeschlossenen Sachgebiete ein; sie wurde bis Ende des Jahres im wesentlichen abgeschlossen. Weiterhin wurden Prozeduren für die Verarbeitung der angelieferten Daten und die Programmpflege ausgearbeitet.

Tabelle 3: Rechenzeiten und Anzahl der Jobs für alle Benutzer-Institutionen

Benutzung der IPP-Rechenanlage im Jahre 1974 durch folgende Institute	Rechenzeit	Anteil %	Jobanzahl	Anteil %
IPP MPI für Plasmaphysik, Garching	1917:13'44"	37,56	109 519	35,43
MAE MPI für Ionosphärenphysik, Lindau/Harz	5:12'24"	0,10	737	0,24
MEL MPI für Biochemie, Martinsried	13:54' 7"	0,27	1 877	0,61
MFK MPI für Festkörperforschung, Stuttgart	40:42'29"	0,80	4 460	1,44
MPA MPI für Astrophysik, München	1413:30'18"	27,69	44 321	14,34
MPC MPI für Chemie, Mainz	77:44'41"	1,52	2 263	0,73
MPE MPI für extraterrestrische Physik, Garching	537:23'56"	10,53	26 173	8,47
MPP MPI für Physik, München	575:15'45"	11,27	22 596	7,31
MPS MPI für Psychiatrie, München	36:22'20"	0,71	19 460	6,30
MSF MPI für Strömungsforschung, Göttingen	7:22'22"	0,14	99	0,03
AAM Arbeitsgem. f. Ausb. Forsch. i. d. Medizin, München	0: 0,37"	0,00	43	0,01
IFO Institut für Wirtschaftsforschung, München	8:18'40"	0,16	3 802	1,23
LHM Stadtentwicklungs-Referat Landeshauptstadt München	7:20'48"	0,14	3 125	1,01
NBD Stadt Neuburg/Donau	0:12'42"	0,00	55	0,02
LAM Stadt Lohr/Main	0:12'24"	0,00	44	0,01
SBP Staatsinstitut für Bildungsplanung, München	3:44'19"	0,07	2 491	0,81
THM Technische Universität, München	242:41'29"	4,75	26 129	8,45
THP Physikdepartment der Techn. Universität, München	109:10' 7"	2,14	20 201	6,54
UMU Universität München	95:59'30"	1,88	18 758	6,07
ARF Volks- u. betriebsw. Rechnungswesen UNI-Frankfurt, Frankfurt	0:15' 0"	0,00	196	0,06
VLI Inst. Max von Laue / Paul Langevin, Garching	4:45'27"	0,09	1 223	0,40
WIS Kommission für Tieftemperaturforschung, Garching	2:53' 4"	0,06	749	0,24
GIM Goethe-Institut, München	0:51'51"	0,02	438	0,14
ACF Anorganische Chemie der Universität FfM., Frankfurt	3: 4'40"	0,06	34	0,01
DVF DFV für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen	0: 1'55"	0,00	16	0,01
DJI Deutsches Jugendinstitut, München	0:13' 9"	0,00	202	0,07
IPF Institut für Plasmaforschung, Stuttgart	0: 6'38"	0,00	52	0,02
Summe aller Institute:	5104:34'24"	100,00	309 063	100,00

Bereich Relativistische Plasmen

(Prof. Dr. Arnulf Schlüter)

Zu Beginn des Berichtsjahres war im Elektronen-Beschleuniger das Verhalten der Elektronenringe während der Ringkompression soweit verstanden – insbesondere waren auch die früher aufgetretenen kollektiven Instabilitäten beseitigt –, daß die Beschleunigung der Elektronenringe in einem schwach divergenten Magnetfeld angegangen werden konnte. So wurden zunächst unbeladene Elektronenringe zu Geschwindigkeiten von bis zu $3 \cdot 10^9$ cm/sec beschleunigt. Dabei hat sich die theoretische Voraussage bestätigt, daß die axiale Fokussierung des Elektronenrings durch elektrische Spiegelladung auf einer Struktur mit anisotroper Leitfähigkeit bewirkt werden kann. Dies ist wichtig, weil man dann nicht auf Ionen-Fokussierung angewiesen ist, die einen Beladungsgrad von etwa 5% verlangen würde. Diese Beladung würde zu Instabilitäten führen.

Bei reinen Elektronenringen wurden axiale Halbwertsbreiten von kleiner als 1 cm gemessen. Es konnte dann gezeigt werden, daß mit Wasserstoff oder Helium beladene Ringe ebenfalls als kollektives Gebilde beschleunigt werden können. Die effektive Beschleunigungsstrecke war ca. 5 cm. Es wurden Energien von 200 keV/Nukleon erreicht. Die „holding power“ der beschleunigten Elektronenringe ergab sich damit zu 3–4 MV/m. Mit einer unabhängigen Methode konnte dies für Heliumbeladung bestätigt werden: Kunststoff-Folien wurden mit den Heliumionen bestrahlt und die Spuren durch einen Ätzzvorgang sichtbar gemacht. Diese Methode ist unempfindlich gegen Protonen und Elektronen.

1. ELEKTRONENRING-BESCHLEUNIGER-EXPERIMENT

(C. Andelfinger, J. Fink, W. Herrmann, D. Jacobi, W. Ott, U. Schumacher, M. Ulrich)

Die Experimente zur Entwicklung eines Elektronenring-Beschleunigers wurden an zwei verschiedenen Anordnungen durchgeführt. Am Hauptexperiment („Schuko“) werden eine sehr schnelle Kompression, ein schnelles Herausschieben („roll-out“) und eine sanfte Beschleunigung des mit Ionen beladenen Elektronenringes untersucht. Mit dieser Anordnung konnte die kollektive Beschleunigung von Wasserstoff- und Helium-Ionen im Berichtsjahre nachgewiesen werden. In einer zweiten Experimentieranlage („Uncompressor“), in der sich die Elektronenringe nicht komprimieren lassen, werden der Injektionsprozeß und die kurz darauf

eintretenden longitudinalen und transversalen kollektiven Instabilitäten experimentell untersucht.

Nach einer kurzen Beschreibung der Experimentieranlagen werden die Ergebnisse der Untersuchungen an kollektiven Instabilitäten, über die Beschleunigung der Elektronenringe und über die ersten Ergebnisse an kollektiv beschleunigten Ionen gegeben.

In Abb. 1 ist das „Schuko“-Experiment¹⁾ schematisch wiedergegeben. Das Magnetfeld wird von einer einwindigen axial ausgedehnten Spule erzeugt. Die Spuleninduktivität von nur 100 nH erlaubt eine sehr schnelle Kompression, und die gute Homogenität des Magnetfeldes nahe der Achse macht eine sanfte Beschleunigung des Elektronenringes möglich. In der Nähe der Einschubebene für den Elektronenstrahl ist die Spule so geformt, daß ein Magnetfeldindex von etwa 0.55 auf dem Einschubradius von 15.5 cm

¹⁾ U. Schumacher, MPI für Plasmaphysik, Garching, Report 0/10 (März 1972)

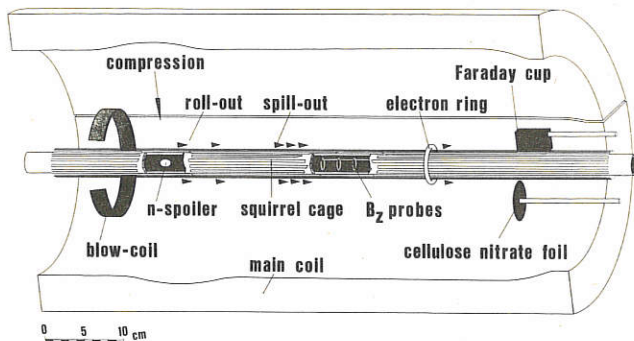


Abb. 1: Schema des Kernstücks des Elektronenring-Beschleuniger-Experimentes

erreicht wird. Die Ringkompression ist anfänglich etwa 0,2 cm pro Elektronen-Umlauf. Alle gefährlichen Einzelteilchen-Resonanzen, die zu einer Vergrößerung der kleinen Ringdimensionen führen würden, werden innerhalb der ersten 100 nsec durchkreuzt, so daß sie keinen nennenswerten Einfluß auf den Ring haben. Die Ringkompression bis zu dem Endradius von 2,3 cm erfolgt in etwa 10 μ sec.

Die Experimente wurden mit verschiedenen Einschubströmen (bis zu 450 A) durchgeführt, wobei sich im komprimierten Zustand des Ringes Elektronenzahlen von $N_e = (5 \pm 2) \cdot 10^{12}$ ergaben. Die kleinen Halbachsen in radialer und axialer Richtung lagen bei etwa 0,3 cm.

Nachdem der Ring durch Stoßionisation des eingefüllten Gases (oder auch durch Restgas) mit Ionen beladen ist, wird er von der Kompressionsebene zum Beschleunigungsteil geschoben. Dieser Übergang erfolgt durch eine zusätzliche kleine einwindige Spule („blow coil“), die den Ring (bei nahezu konstantem großen Radius) in axialer Richtung über etwa 15 cm zum Überlaufpunkt („spill-out“) „bläst“. Der Elektronenring wird dann in z-Richtung beschleunigt durch die radiale Komponente B_r des Magnetfeldes von nur wenigen Gauß, die von einer geringen radialen Divergenz der Spulinnenfläche erzeugt wird. Um die Magnetfeldkonfiguration zu ändern, können speziell geformte axial-symmetrische gut leitfähige Körper auf die Achse gebracht werden. Als „n-spoiler“ gestatten sie die Variation des Feldindex n und dessen radialer Ableitung $\partial n / \partial r$ während der Ringkompression und des „roll-out“, wie man es zur Untersuchung der kollektiven Instabilitäten benötigt. Sie ermöglichen auch die B_r -Variation im Beschleunigungsbereich.

In den ersten Experimenten mit dieser Anlage wurden gegen Ende der Ringkompression starke kollektive radiale Schwingungen beobachtet. Die Frequenz ω dieser Schwingungen lag in der Nähe von S , das definiert ist durch $S = \omega_{ce} (1 - \nu_r)$, wo ω_{ce} die Elektronenumlauf Frequenz ist, und ν_r mit dem äußeren Magnetfeld zu $\nu_r = \sqrt{1 - n}$ berechnet wird. Durch Beladung der Ringe mit Ionen wurden die beobachteten Schwingungsfrequenzen zu kleineren Werten hin verschoben, während gleichzeitig die Instabilität stark anwuchs. Die nächsten Experimente / 3 / konzentrierten sich darauf, die Ursachen dieser Schwingungen zu finden. Sie werden angefacht durch die kollektive Elektron-Ion-Di-

pol-Instabilität, wie sie zuerst von *Koshkarev* und *Zenkevich* untersucht worden ist, oder durch Störungen im äußeren elektrischen oder magnetischen Feld.

Die kollektiven radialen Schwingungen wurden mit drei verschiedenen Methoden beobachtet:

- durch Röntgenstrahlen, die von Elektronen erzeugt werden, die einen dünnen Draht innerhalb des Gleichgewichtsradius des komprimierten Elektronenringes treffen,
- durch die Messung des magnetischen Eigenfeldes des Elektronenringes mit geeigneten Magnetfeldsonden,
- durch die räumlich aufgelöste Messung der Synchrotronstrahlung des Ringes.

Aus diesen Messungen ergab sich, daß der Ring bei kleinen Werten des Magnetfeldindex (gegen Ende der Kompression) um die Magnetfeldachse eine Präzessionsbewegung mit der Frequenz $\omega \approx S = \omega_{ce} (1 - \nu_r)$ und radialen Amplituden ausführte, die mit dem großen Elektronenringradius ($R_e = 2,3$ cm) vergleichbar waren, während die axialen Amplituden kleiner als 0,1 cm blieben. Das Auftreten und das Anwachsen dieser kollektiven radialen Instabilitäten hing sehr stark ab von

- dem Betrag der Ionenbeladung des Ringes (da Restgas immer vorhanden ist, nahm die Beladung mit der Zeit zu mit einer Rate, die vom Restgasdruck abhängt),
- der Größe der Abweichung von der Axialsymmetrie, die für kollektive Frequenzen unterhalb von etwa $5 \times 10^{-3} \omega_{ce}$ kritisch wurde,
- den Magnetfeldparametern n und $\partial n / \partial r$, die durch Einsetzen verschiedener „n-spoiler“ auf der Kompressorachse variiert wurden.

Aus den experimentellen Untersuchungen ergaben sich die folgenden empirischen Resultate:

- Die Instabilität tritt hauptsächlich bei kleinen Werten von n auf.
- Die Anwachsrate und Amplituden nehmen mit der Ionenbeladung zu in Übereinstimmung mit der Theorie der Ionen-Elektronen-Dipol-Instabilität von *Koshkarev* und *Zenkevich*²⁾ und *Dommaschk*³⁾.
- Die Schwingungen erscheinen und wachsen an, wenn der Landaudämpfungskoeffizient kleine Werte annimmt, und sie stabilisieren sich und verschwinden anschließend, wenn der Koeffizient wieder genügend zugenommen hat.
- Im Falle, in dem kein „n-spoiler“ verwendet wurde, traten stationäre große Amplituden auf. (Die Sättigung der Amplituden in diesem Fall mag nichtlinearen Effekten zuzuschreiben sein, die in der oben erwähnten Theorie nicht enthalten sind.)
- Die kollektiven Schwingungen wurden durch Einsetzen eines kleinen „n-spoilers“ (von 5 mm Radius) auf der Achse erfolgreich unterdrückt.

Mit diesen „stabilen“ Bedingungen konnten die Elektronenringe erfolgreich in die Beschleunigungssektion „geblasen“ werden. Durch Einschalten der „blow coil“, die das Magnetfeld in der Ring-Kompressionsebene verändert,

²⁾ D. G. Koshkarev und P. R. Zenkevich, Inst. f. Theor. and Exp. Physics Report Dez. 1970, Moskau, UdSSR; Particle Accelerators 3, 1972, p. 1
³⁾ W. Dommaschk, MPI für Plasmaphysik, Garching, Report IPP 0/19 (Dez. 1973)

wird der Elektronenring in die Beschleunigungsstrecke gebracht. Dabei zeigte sich am Auftreten eines Röntgenstrahl-Signals, daß der Ring zerstört wurde, bevor er den Überlaufpunkt zur Beschleunigungsstrecke („spill out point“) erreicht hatte. Der Ring wurde um so früher zerstört, je mehr Elektronen er enthielt. Diese Beobachtung wird von einer numerischen Berechnung / 106, IPP 0/21 / des Gleichgewichts selbstfokussierter Elektronenringe beschrieben, wobei sich ergibt, daß ohne äußere Fokussierungs- oder Spiegelfelder für die vorliegenden Parameter die Fokussierung in axialer Richtung ungenügend ist, wenn die Ionenbeladung geringer als 5% ist. Im Experiment konnte der Ring über den Überlaufpunkt hinübergebracht werden, nachdem die axiale Fokussierung durch die Verwendung von Spiegelfeldern auf einem Zylinder mit anisotroper Leitfähigkeit erhöht worden war. Als derartige Zylinder wurden vor allem solche vom „squirrel cage“-Typ verwendet, die aus axial gerichteten dünnen Kupferstreifen bestehen und sich durch die ganze Spule erstrecken (bei einem Radius von 1,6 cm). Mit dieser zusätzlichen axialen Fokussierung konnten die Ringe über den Überlaufpunkt in die Beschleunigungsstrecke gebracht und darin beschleunigt werden.

Das Verhalten der beschleunigten Ringe wurde mit verschiedenen Diagnostikverfahren untersucht: Magnetfeldsonden messen das B_z des vorbeilaufenden Ringes. Am Ende der Beschleunigungsstrecke sammelt ein Faraday-Becher die Elektronen und gestattet damit die Bestimmung der Elektronenzahl und der axialen Ringbreite am Ende der Beschleunigung. Abb. 2 zeigt ein Oszillogramm der Summe eines Magnetfeld-Signals (\dot{B}_z) und des Faraday-Becher-Signals.

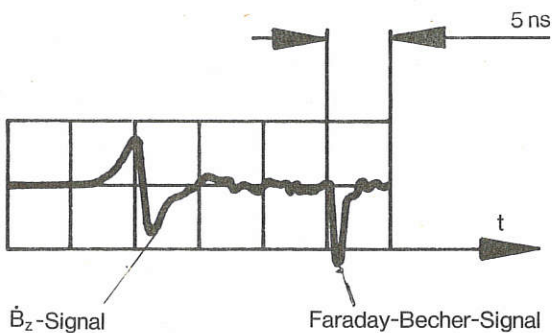


Abb. 2: Oszillogramm mit der Addition eines Magnetfeldsondensignals und des Faraday-Bechers

Die Geschwindigkeit des Elektronenringes ergibt sich sowohl aus der Flugzeit zwischen der Sonde und dem Faraday-Becher als auch aus der Form des SONDENSIGNALS. Die lokale Geschwindigkeit und Beschleunigung erhält man aus den Signalen dreier magnetischer Sonden, die je 2 cm in axialer Richtung voneinander entfernt sind und an verschiedene axiale Positionen gebracht werden können.

Aus der Dauer des Faraday-Signals und der lokalen axialen Geschwindigkeit erhält man eine obere Grenze für die axiale Halbwertsbreite des beschleunigten Elektronenringes, die weniger als 1 cm beträgt, woraus sich ergibt, daß die Ringe als kohärente Gebilde beschleunigt werden.

In weiteren Experimenten wurden die Ringe mit Ionen beladen, und es ergab sich, daß die Beschleunigung der

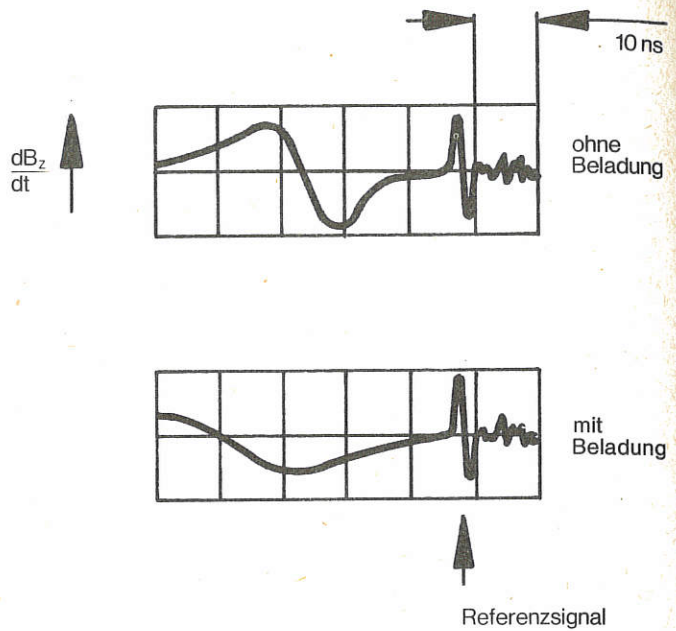


Abb. 3: Magnetfeldsondensignale mit und ohne He-Beladung

Ringe von dem Gasdruck des ins Vakuumgefäß gefüllten Gases Wasserstoff oder Helium abhing. Als Beispiel dieser Abhängigkeit wird in Abb. 3 das Magnetfeldsignal eines unbeladenen Elektronenringes (oben) mit dem eines mit Helium beladenen Ringes (unten) an derselben axialen Position verglichen. Die Flugzeit nimmt durch die erhöhte Masse des beladenen Ringes zu.

Die Abhängigkeit der Ringbeschleunigung an einer festen axialen Position (etwa 6 cm vom „Überlaufpunkt“ entfernt) vom Wasserstoffdruck ist in Abb. 4 gezeigt. Es ergibt sich, daß die Ringbeschleunigung um so kleiner wird, je höher die Ionenbeladung gemacht wird. Die durchgezogene Kurve ist

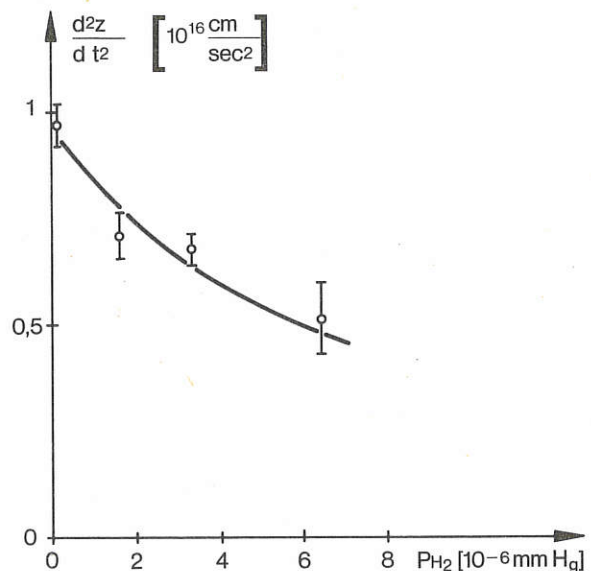


Abb. 4: Gemessene Ringbeschleunigung als Funktion des Wasserstoff-Fülldruckes.

die erwartete Abhängigkeit der Beschleunigung, die proportional zu

$$\left(1 + \frac{M_i}{m_e \gamma} \frac{N_i}{N_e}\right)^{-1}$$

ist, wobei $\frac{M_i}{m_e}$ das Ruhmassenverhältnis, $\frac{N_i}{N_e}$ das Verhältnis von Ionen- zu Elektronenzahlen sowie γ der relativistische Faktor der umlaufenden Elektronen ist. Es wird angenommen, daß H^+ und H_2^+ durch Stoßionisation der Elektronen erzeugt werden. Das experimentelle Ergebnis stimmt innerhalb eines Faktors 2 mit den erwarteten Werten überein.

Da die Beschleunigung monoton entlang der Beschleunigungsstrecke zunimmt, kann die „holding power“ der Elektronenringe aus der maximalen Beschleunigung bestimmt werden, bis zu der ein Unterschied der Beschleunigungswerte mit und ohne Beladung festgestellt wird. Überschreitet die Beschleunigungskraft diesen Wert, geht die Trägheit des Ringes in die des reinen Elektronenringes über. In Abb. 5 ist die Beschleunigung mit und ohne Wasserstoff-Beladung über dem axialen Abstand z von der Kompressions-ebene aufgetragen. Die axiale Abhängigkeit wird damit erklärt, daß H_2^+ -Ionen zuerst und anschließend die H^+ -Ionen bei höheren Beschleunigungswerten verloren werden. Die

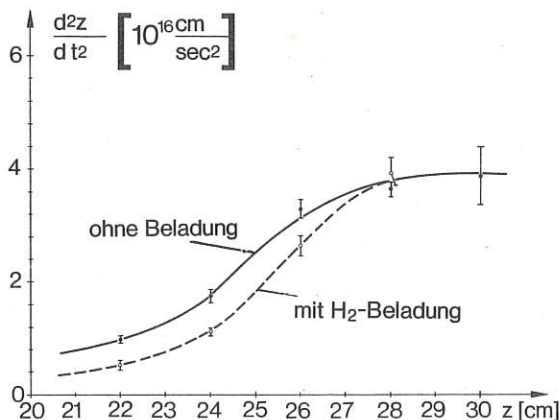


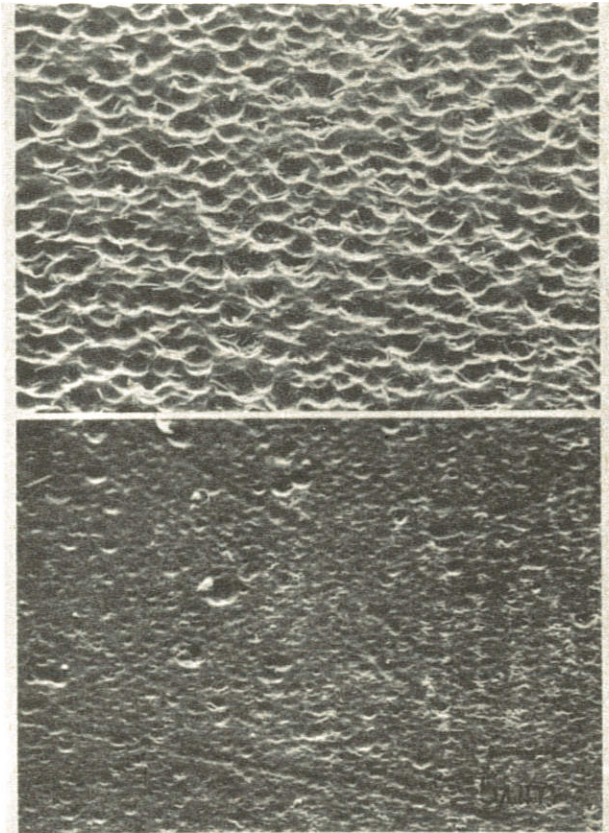
Abb. 5: Axiale Verteilung der Ringbeschleunigung mit und ohne Beladung mit Wasserstoff

„holding power“ der Elektronenringe beträgt 3 bis 4 MV/m und ist nicht groß genug, um die Ionen über die ganze Beschleunigungslänge an den Elektronenring zu binden. Die Energie, die die Ionen auf der ausnutzbaren Beschleunigungslänge, von wenigen cm, gewinnen, beträgt etwa 200 keV für Wasserstoff- und 400 keV für Helium-Ionen.

Die kollektive Beschleunigung der He-Ionen wurde darüberhinaus auch durch eine Kernspur-Methode mit dünnen Zellulosenitrat-Folien nachgewiesen⁴⁾. Die Spuren können nur sichtbar gemacht werden, wenn die Energie der He-Ionen größer als etwa 200 keV ist; sie werden durch Wasserstoff-Ionen oder Elektronen nicht erzeugt.

Abb. 6 zeigt ein Bild einer Folienfläche, mit einem Elektronen-Rastermikroskop aufgenommen, die mit kollektiv be-

Abb. 6: Elektronenrastermikroskopaufnahmen eines Zellulosenitratfolienstückchens, von kollektiv beschleunigten Helium-Ionen getroffen (oben), und zum Vergleich das nur von einem unbeladenem Elektronenring beschossene (unten).



schleunigten He-Ionen beschossen wurde (oben) und — zum Vergleich — eine Fläche, die nur von Elektronen getroffen wurde (unten). Jeder Krater im oberen Bildteil hat einen Durchmesser von etwa $1 \mu\text{m}$ und entspricht einem He-Ion, das auf die Folie prallte. Die Gesamtzahl der pro Puls beschleunigten He-Ionen ist mindestens 10^8 , was eine praktisch vollständige Bedeckung der Oberfläche mit Kratern bedeutet.

Obwohl hiermit gezeigt wurde, daß Elektronenringe als kohärente Einheiten und mit ihnen Wasserstoff- und Helium-Ionen kollektiv beschleunigt werden können, wird deutlich, daß die „holding power“ für einen sinnvollen Elektronenring-Beschleuniger noch ganz erheblich erhöht werden muß. Die Experimente werden derzeit dazu gemacht.

Um die „holding power“ der Elektronenringe noch weiter zu erhöhen, d. h. um die Ringe zu noch höheren Beschleunigungsraten zu bringen, ohne daß sie die Ionen verlieren, ist es günstig, die Elektronenzahl in den Ringen zu erhöhen. Dann aber können kollektive Instabilitäten wie die „negative mass“-Instabilität oder die „transverse resistive wall“-Instabilität während der Kompression auftreten. Diese Instabilitäten können durch gut leitfähige Wände nahe am Elektronenring unterdrückt werden⁵⁾. Der schnelle Magnet-

⁴⁾ s. z. B. H. G. Paretzke, Ges. für Strahlen- und Umweltforschung, München, Report GSF-Bericht S 138, Mai 1971

⁵⁾ s. z. B. L. J. Laslett, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-20, No. 3, June 1973, p. 271

feldanstieg in unserem Experiment erlaubt dagegen nur geringe Leitfähigkeit in seitlichen Wänden, damit das Magnetfeld gut bis zum Elektronenring eindringen kann. Der Oberflächenwiderstand der Seitenplatten sollte demnach größer als $1 \Omega / \square$ sein. Somit erschien es nötig zu untersuchen, ob ein so hoher Wandwiderstand für die Unterdrückung der kollektiven Instabilitäten ausreichend ist. Dazu eignet sich das „Uncompressor“-Experiment, bei dem die Instabilitäten in Ringen ohne nachfolgende Kompression untersucht werden. Die Strahleinschubbedingungen sind denen im „Schuko“-Experiment sehr ähnlich.

Im „Uncompressor“-Experiment / 76 / wurden ohne leitende Seitenwände starke Signale mit der Elektronenumlauf Frequenz beobachtet. Dabei wurde die radiale Ringdimension bis zu 8 cm Halbwertsbreite aufgeweitet und dabei der große Ringradius verkleinert. Beide Ergebnisse hingen stark von der Strahlenintensität ab. Der mit der Verringerung des großen Radius bei vollem Elektronenstrom verknüpfte Energieverlust entspricht einer Strahlungsleistung von 10 MW und kann mit einer Modulation von 10 bis 50% in der Elektronendichte erklärt werden.

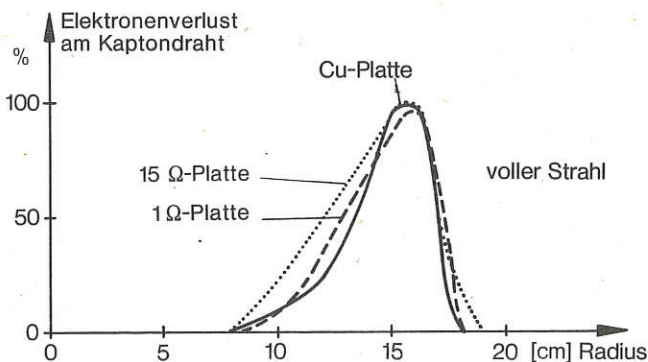


Abb. 7: Radiale Elektronendichteverteilung im Ring für verschiedene gut leitfähige Seitenplatten

Weitere Untersuchungen wurden mit Oberflächenwiderständen von $0,6 m\Omega / \square$ bis $15 \Omega / \square$ durchgeführt. Die Zahl der Elektronen, die eingefangen werden konnte, war für alle Seitenplatten etwas mehr als $3 \cdot 10^{12}$ (das davon verschiedene frühere Ergebnis wurde durch elektrische Überschlüge an den Seitenplatten während des Inflektionsimpulses bestimmt). Die Abhängigkeit der radialen Ringbreite von der Wandleitfähigkeit ist in Abb. 7 zu sehen. Die radiale Breite wurde mit einem Drähtchen aus isolierendem Material (Kapton) bestimmt, das an verschiedenen Radien angebracht wurde, indem der übrigbleibende Strahlstrom gemessen wurde. Die Halbwertsbreite des Ringes (kleiner Durchmesser) war etwa 4 cm für alle Werte des Oberflächenwiderstandes von $0,6 m\Omega / \square$ bis $2,5 \Omega / \square$. Für $15 \Omega / \square$ nahm die Halbwertsbreite deutlich zu auf etwas mehr als 5 cm. Der mittlere große Radius betrug etwa 16 cm und blieb nahezu konstant für alle Untersuchungen mit Seitenplatten. Mit magnetischen Sonden in der Nähe des Ringes wurden stationäre oder gedämpfte Schwingungen

mit der Elektronen-Umlauffrequenz ω_{ce} und mit der Frequenz $S = (1 - \nu_r)\omega_{ce}$ der ersten radialen kollektiven Schwingung in Fällen verschiedener Wandleitfähigkeit beobachtet. Ein Anwachsen der Schwingungen wurde nicht beobachtet, und es ist unklar, ob diese Schwingungen irgendeinen Einfluß auf die kleinen Ringdimensionen haben. Es erscheint möglich, daß diese Schwingungen nur die azimutale Modulation des Ringes widerspiegeln, die durch die Strahlinflection geprägt wird.

2. NEUTRALGASEINSCHUSS

(G. Siller, E. Buchelt, H. B. Schilling)

Bei Experimenten mit schweren Ionen, die im Elektronenring hochionisiert werden sollen, kann die Ringbelastung nur kurzzeitig unter extrem guten Vakuumbedingungen erfolgen. Es ist daran gedacht, den Elektronenring in etwa $1 \mu s$ durch einen Neutralgasstrahl zu führen, wobei die relativistischen Elektronen durch Stoßionisation Ionen bilden, die im Elektronenring eingefangen werden. In einer Testapparatur wurden Clusterstrahlen, z. B. CO_2 und Argon, gebildet, deren radiales Profil sehr scharf begrenzt ist und sich daher sehr gut in einer Kältefalle (Kryopumpe) ausfrieren lassen, so daß das Vakuum nicht verschlechtert wird. Die „Cluster“ werden durch Expansion ins Vakuum durch eine feine Düse ($d \approx 0,1 \text{ mm } \phi$) gebildet. Die Teilchenzahl pro „Cluster“ ergab sich zu $10^2 - 10^3$ und die im Strahl erzeugte Teilchendichte ergab sich je nach Ausgangsdruck zu $6 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Damit ist man in der Lage, in $1 \mu s$ Elektronenringe mit $5 \cdot 10^{12}$ Elektronen mit einigen % Ionen zu beladen⁴⁾.

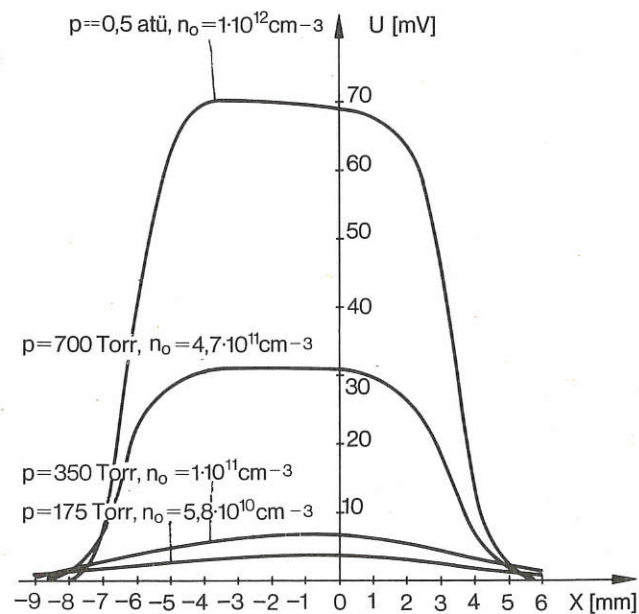


Abb. 8: Profil eines Argon-Clusterstrahls: Düse $0,01 \text{ cm } \phi$; Kollimator $0,18 \text{ cm } \phi$; Abstand vom Kollimator zur Messebene 20 cm.

⁴⁾ IPP-Report 0/27 (1975)

3. THEORETISCHE ARBEITEN

(W. D o m m a s c h k, W. Herrmann, I. Hofmann,
P. Merkel, W. Ott, A. U. Luccio*), C. E. Nielsen^{*)})

a) Die Elektronen-Ionen-Resonanz wurde für elliptisch verformte Bennett-Dichteprofile untersucht und dafür etwas kleinere Kopplungskonstanten gegenüber dem Fall des Kastenprofils gefunden.

Ferner wurde der Fall untersucht, daß sich zwei verschiedene Ionensorten im Elektronenring befinden, die mit den Elektronen und untereinander in kollektiver Wechselwirkung stehen / 159 /. Die numerischen Untersuchungen ergaben, daß die Interferenz der verschiedenen Wechselwirkungen keine wesentliche Veränderung der Wachstumsraten bzw. der Frequenz der Instabilität zur Folge hat. Die bei der Elektronen-Ionen-Resonanz auftretende kohärente transversale $m = 1$ Mode, die aber auch durch azimutale Feldstörungen in der Nähe der $\nu_r = 1$ Resonanz auftreten kann, wurde unter Hinzunahme der Ringeigenfelder und der elektrischen Spiegelfelder einer fokussierenden „squirrel cage“-Struktur untersucht.

b) Transversale kollektive Effekte des reinen Elektronenringes spielen eine wichtige Rolle bei der Inflektion des Elektronenstrahls in das magnetische Spiegelfeld des Ringkompressors. Mit einem numerischen Modell, in dem die Elektronen durch eine Gesamtheit von Makroteilchen simuliert wurden, wurde die Wechselwirkung von drei übereinander injizierten Strahlen betrachtet. Die Möglichkeit der Selbstinflektion, sowie Bedingungen, für die die Strahlaufweitung durch transversale kollektive Effekte minimal ist, wurden gefunden / IPP 0/26 /.

c) Effekte von Spiegelströmen, die auftreten, wenn der Elektronenring entlang leitfähiger Wände geführt wird, wurden für zwei Fälle untersucht. Erstens für die Phase der Ringkompression zwischen leitfähigen aber widerstandsbehafteten Wänden. Es ergab sich, daß der Energieverlust der Elektronen für die vorliegenden Ringströme zu vernachlässigen ist, daß aber der effektive Feldindex und damit die Fokussierungseigenschaften durch die Dämpfung der Spiegelströme merklich beeinflusst wird / IPP 0/25 /.

Im zweiten Falle wurde die Phase des „roll-out“ und der Beschleunigung des Elektronenringes entlang eines leitfähigen Zylinders untersucht. Hierbei treten Bremskräfte auf, die bei gegebener Leitfähigkeit bis zu einer kritischen Geschwindigkeit anwachsen, von da an aber abfallen und schließlich zu einer „run away“-Situation führen / IPP 0/25, IPP 0/24 /.

*) A. U. Luccio, Universität Pisa/Italien

*) C. E. Nielsen, Ohio State University/USA

Bereich Technologie

(Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter)

Während des Jahres 1974 begann die Realisierung der den Bereich Technologie betreffenden Maßnahmen zur Änderung der Arbeitsweise des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik. Als eine der letzten größeren Aufgaben der früheren Abteilung Technik fand die 1972 begonnene Entwicklung eines gepulsten CO₂-Hochleistungslasers im Juli ihren erfolgreichen Abschluß, und die Bearbeitung der Themenkreise „Laser-Plasma-Quelle“, „Fusionsreaktorelektrotechnik“ und „Systemstudien“ im Rahmen von Projekten wurde aufgenommen.

Die Thematik „Laser-Plasma-Quelle“ betrifft die Entwicklung von Verfahren zur Füllung toroidaler Apparaturen mit Plasmen durch Bestrahlung freier Wasserstoffpellets mit Laserlicht und die Brennstoffzufuhr in Fusionsreaktoren mit Hilfe beschleunigter Pellets. Das Projekt wurde im April 1974 gegründet. Die Arbeiten sind hier zunächst am Problem der Füllung des Stellarators W II b mit einem 10⁶[K] heißen und 10¹⁴ [cm⁻³] dichten, lasererzeugten Plasma orientiert; sie reichen von der Entwicklung und Erprobung von Pelletquellen und Triggerverfahren über Untersuchungen der Laserstrahl-Wand-Wechselwirkung bis hin zur Theorie der Plasmaerzeugung und -expansion.

Die „Fusionsreaktorelektrotechnik“ umfaßt die Technologien der elektrischen Systeme für Plasmaeinschließung und -heizung. Innerhalb des im Oktober 1974 gegründeten Projekts wurden die bis dahin in der Gruppe Magnetfeldtechnik laufenden supraleitungstechnologischen Arbeiten fortgeführt. Dazu gehörten im wesentlichen die Tieftemperatur-Neutronenbestrahlung von Nb₃Sn-Drähten, die Untersuchungen der W VII-Prototypspule und Entwicklungsarbeiten zum Kryotron-Schaltprinzip.

Auf dem Gebiete der „Systemstudien“ lagen die Akzente auf der Blankettechnologie und der Fertigstellung des Rechenprogrammes „SYSTEMS“, das für die Festlegung der Hauptentwurfparameter des „Collaborative Tokamak Reactor Design“ benutzt wurde. Das Sachgebiet ging im Oktober 1974 von der Gruppe Projektierung an das Projekt Systemstudien. Dieses Projekt ist nun auch für die Mitarbeit des Instituts im Programm „Angewandte Systemanalyse“ der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF) zuständig.

1. LASER-PLASMA-QUELLE

(M. Salvat, H. Baumhacker, H. Brinkschulte, K. Büchl, M. Hashmi, R. Lang, L. Lengyel, W. Riedmüller, F. Schwirzké*)

Aufgabe des Projekts ist die Produktion von freien Pellets (Targets) aus kondensierten Wasserstoffisotopen und die

*) Gastforscher von Naval Postgraduate School, Monterey/USA

Füllung von toroidalen Magnetfeldkonfigurationen mit den Plasmen, die aus dem Beschuß dieser Pellets mit Hilfe von Hochleistungslasern erzeugt werden. Später soll die Brennstoffzufuhr in Fusionsreaktoren mit Hilfe von freien Pellets untersucht werden.

Dem Projekt (im April 1974 gegründet) wurde als unmittelbares Ziel die Füllung des Stellarators WIIb mit lasererzeugten Plasmen gesetzt.

Die Erzeugung eines — entfernt von den Wänden — voll-ionisierten Plasmas mit einer Temperatur von 10^6 [K] und einer Dichte von 10^{14} [cm^{-3}] wird angestrebt.

Die Planung für die Erfüllung dieser Aufgabe sieht die Entwicklung und Erprobung von Quellen für die Erzeugung von Pellets aus Wasserstoff (bzw. Deuterium), die Vorbereitung der Triggerung des Hochleistungslasers durch die in den Stellarator fallenden Pellets und die Koordinierung der Arbeiten am Stellarator WIIb vor. Es wurde entschieden, einen Hochleistungslaser zu kaufen. Die folgenden Einzelthemen wurden definiert:

1. Entwicklung und Erprobung einer Stanzquelle
2. Entwicklung und Erprobung einer Stäbchenquelle
3. Entwicklung und Erprobung einer kontinuierlichen Quelle
4. Schneiden der Stäbchen mittels Wärmezufuhr
5. Triggerung des Energielasers
6. Vorbereitung des Experiments am WIIb
7. Theorie zur Plasmaerzeugung und Expansion
8. Außerdem werden Begleitexperimente durchgeführt.

1.1 Entwicklung und Erprobung einer Stanzquelle

Der wesentliche Teil der Stanzquelle besteht aus einer Bohrung in einem Kupferblech, welches durch einen Heliumverdampferkryostaten unter die Schmelztemperatur von H_2 bzw. D_2 abgekühlt wird. Der in dieser Düse kondensierte Wasserstoff wird mit einer feinen Nadel ausgestoßen. Der Aufbau der Quelle kann Abb. 1 entnommen werden. Für die

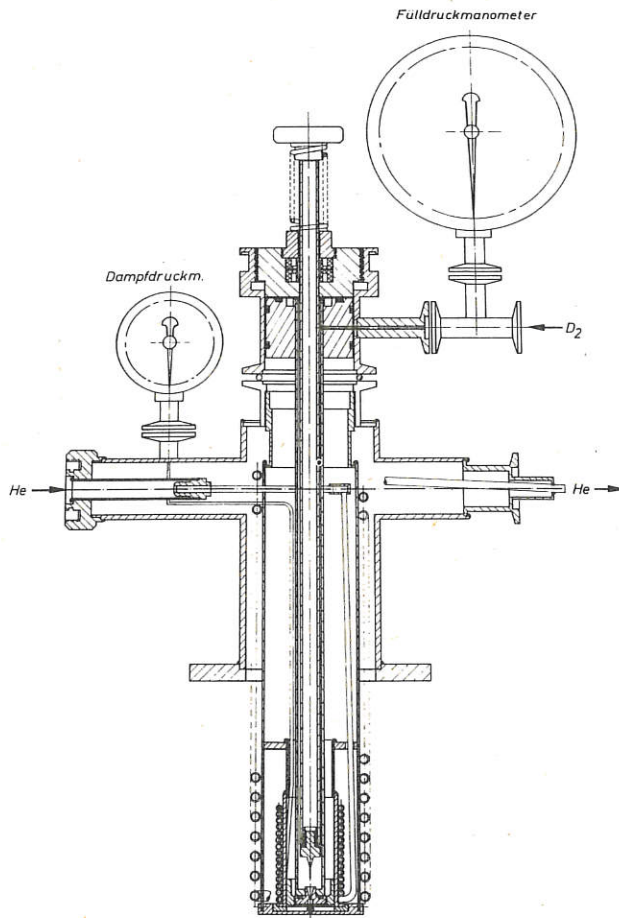


Abb. 1: Aufbau der Stanzquelle SQ1

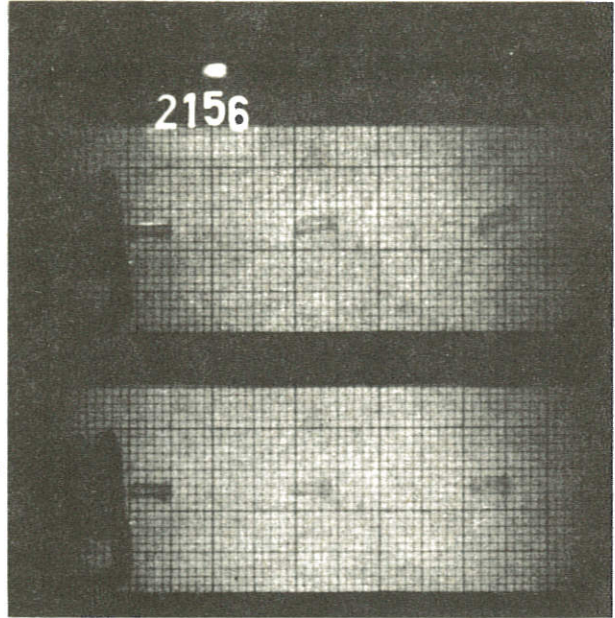


Abb. 2: H_2 -Pellet nach dem Verlassen der Düse. Vergrößerung 5:1.

Experimente wurden Düsen mit folgenden Abmessungen benutzt: Durchmesser 300μ , Länge 600μ . Die erzeugten Pellets haben etwa dieselben Abmessungen. An der Verkürzung der Pellets auf 300μ wird zur Zeit gearbeitet. Die Pellets wurden durch drei aufeinanderfolgende Blitze fotografiert (Abb. 2). Aus den durchgeführten Experimenten ergab sich, daß die Anfangsgeschwindigkeit der Pellets $< 5 \text{ cm/sec}$ war. Die Streuung der Pellets wurde in 12 cm Entfernung von der Düse gemessen (Abb. 3). Der Anteil der

Distribution of pellets vs. distance R from mean trajectory in observation plane

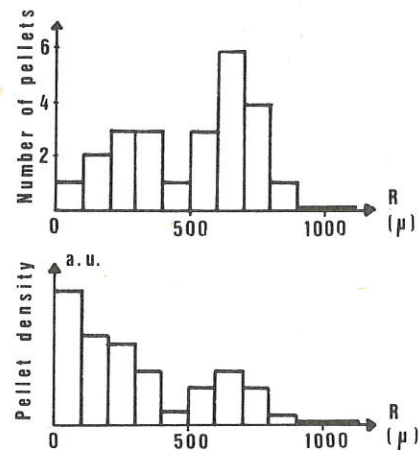


Abb. 3: Pelletverteilung in der Beobachtungsebene 12 cm vor der Düse

Pellets, die durch einen Kreis von 500μ Durchmesser fielen, war etwa $10\text{--}20\%$. Die Auswertung zeigt außerdem eine Ringstruktur in der Verteilung.

1.2 Entwicklung und Erprobung einer Stäbchenquelle

Im Berichtsjahre wurde eine Kryoapparatur zur Produktion der festen Wasserstoff-Stäbchen von 400μ Durchmes-

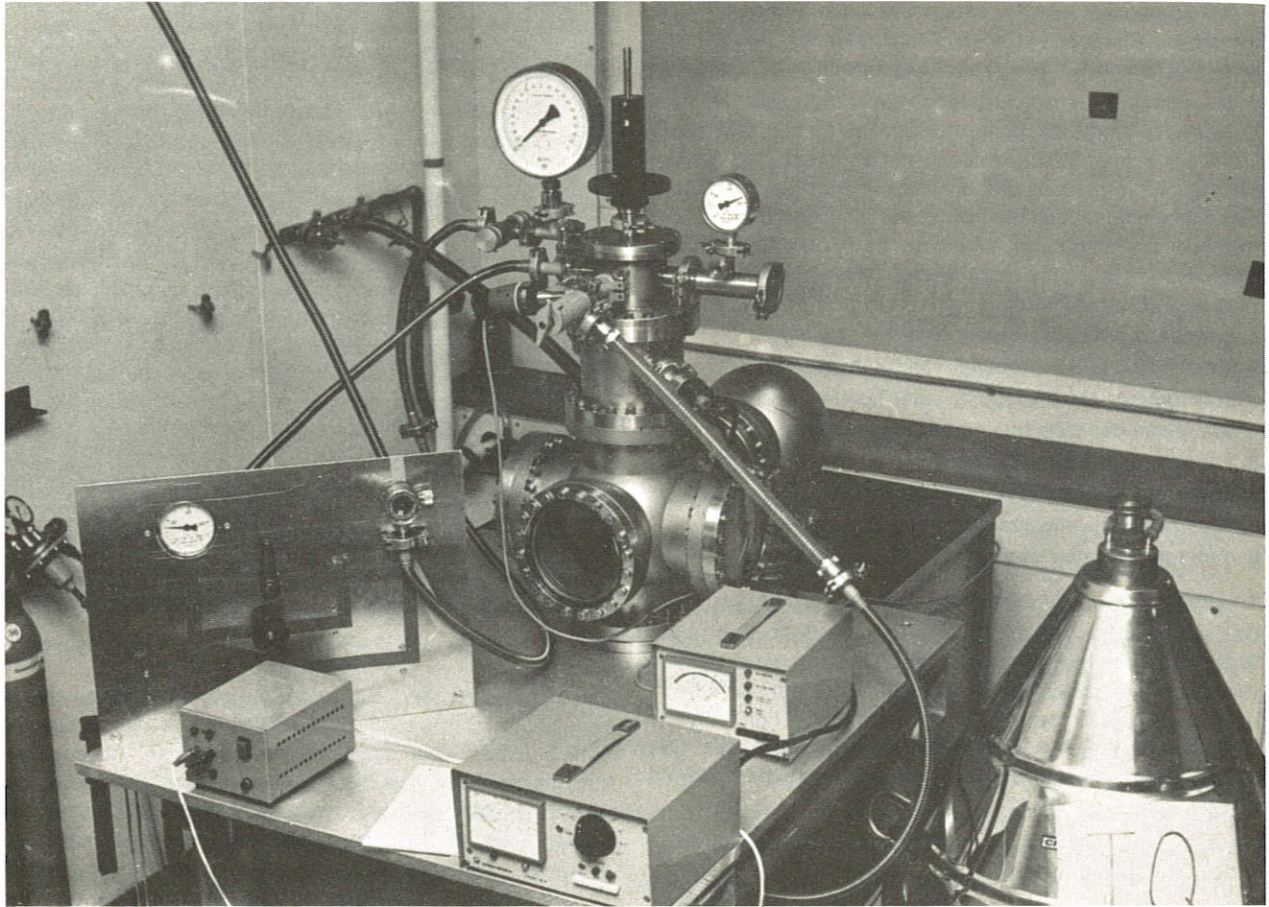


Abb. 4: Apparatur zur Herstellung von Wasserstoffpellets.

ser konzipiert. Wasserstoffpellets von 400μ Durchmesser und 400μ Länge sollen durch Schneiden hergestellt werden. Am Ende des Berichtsjahres konnte mit dem Bau der Apparatur angefangen werden (siehe Abb. 4).

1.3 Entwicklung und Erprobung einer kontinuierlichen Quelle

Als aussichtsreiches Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoffpellets mit konstanter Masse und Geschwindigkeit bei hoher Repetitionsfrequenz gilt die Methode, bei der ein Strahl flüssigen Wasserstoffs in eine regelmäßige Kette einzelner Tropfen zerfällt.

Im vergangenen Jahre wurde eine Anordnung zur Erzeugung von Wasserstofftropfen konstruiert, gebaut und getestet. Es konnte gezeigt werden, daß es möglich ist, eine Kette von Wasserstofftropfen geeigneter Größe herzustellen (Bild 5 auf der nächsten Seite). In Zusammenarbeit mit der Industrie wurde ein verbesserter Kryostat konzipiert, mit dessen Hilfe die weiteren Untersuchungen an Wasserstofftropfen bei genau geregelten Druck- und Temperaturbedingungen durchgeführt werden sollen.

Auf Grund der Schwierigkeiten, die mit dem Einschleusen der Tropfen ins Vakuum und dem Selektieren einzelner Tropfen verbunden sind, erscheint es für erste Versuche am WIIb günstiger, gefrorene Pellets im Hochvakuum zu erzeugen. Hierzu wurde die bestehende Wasserstofftropfenan-

lage so umgebaut, daß es möglich ist, Wasserstoffstäbchen herzustellen, von denen nunmehr ein kleines Stück abgeschnitten werden kann.

1.4 Schneiden der gefrorenen H_2 - (bzw. D_2)-Stäbchen

1. **Problem:** Zur Erzeugung von geeigneten Pellets müssen Teilchen von $0,4 \text{ mm}$ Länge von H_2 - oder D_2 -Zapfen mit $0,4 \text{ mm } \phi$ abgetrennt werden. Dabei dürfen die abgeschnittenen Teilchen keine Beschleunigung in horizontaler Richtung erfahren, damit möglichst viele ohne zusätzliche Führung durch den Fokus ($\phi \approx 0,5 \text{ mm}$) des Energielasers fallen, der sich ca. 250 mm unterhalb der H_2 -Quelle befindet.

2. **Untersuchungen und Ergebnisse:** Zum Abtrennen wurden mehrere Methoden getestet. Da zu dieser Zeit keine H_2 -Quelle vorhanden war, wurden die Untersuchungen an Graphit- und Glasstäbchen bzw. an Wasseriszapfen simuliert. Als brauchbar erwies sich das Schneiden mit Heizschlingen verschiedener Materialien und das Schneiden mit einem kontinuierlichen CO_2 -Laser. Dabei konnte erreicht werden, daß im Abstand von 210 mm von der Schnittstelle bis zu 13% aller geschnittenen Teilchen durch einen Kreis von $0,5 \text{ mm } \phi$ fielen. Hingegen zeigte sich, daß das Schneiden mit gepulsten Nd-Glas- und CO_2 -Lasern unbrauchbar und das Abtrennen mit über Widerstandsdraht geheizter Düse nur bis zu minimalen Längen von 3 mm einsetzbar ist (siehe die Abbildung 6 auf der nächsten Seite!).



Abb. 5: Wasserstofftropfen (Strahldurchmesser 0,27 mm)

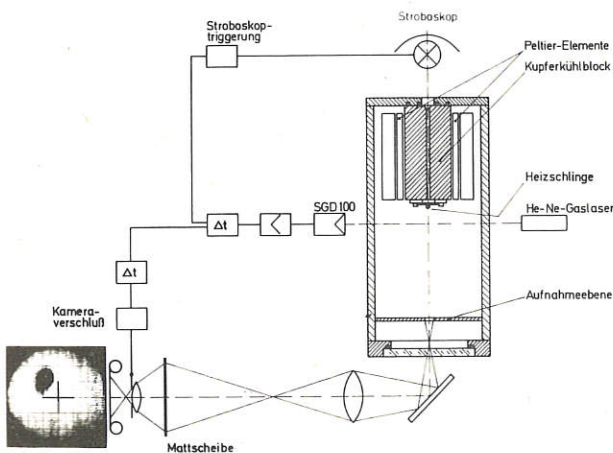


Abb. 6: Anordnung zur Erzeugung und zum Abtrennen von Wassereis und zur Messung der Flugabweichung in x- und y-Richtung

1.5 Triggerung des Energielasers

Das Problem setzt sich aus zwei Teilproblemen zusammen:

1. Der Fokus der Linse muß an den Ort mit der größten Teilchendurchgangswahrscheinlichkeit gebracht werden.
2. Der Laser muß zum richtigen Zeitpunkt getriggert werden.

In einer Ebene senkrecht zur Torusseule von WIIb stehen drei Öffnungen zur Verfügung (Abb. 7). Die seitliche Öffnung A ist die größte; durch sie fällt der Energielaserstrahl ein. Die Öffnung B an der Oberseite des Torus wird zur Einspeisung des Pellets verwendet. Zum Triggern wird die Öffnung A und zum Justieren die Öffnung C benutzt. Dadurch ist es notwendig, daß die Triggerung mit einem vom Pellet reflektierten Lichtsignal erfolgt. Das Pellet erzeugt ein erstes Triggersignal oberhalb des Energielaser-Fokus, welches für die Ansteuerung der Blitzlampen und Faraday-rotatoren des Energielasers benötigt wird. Das Trigger-

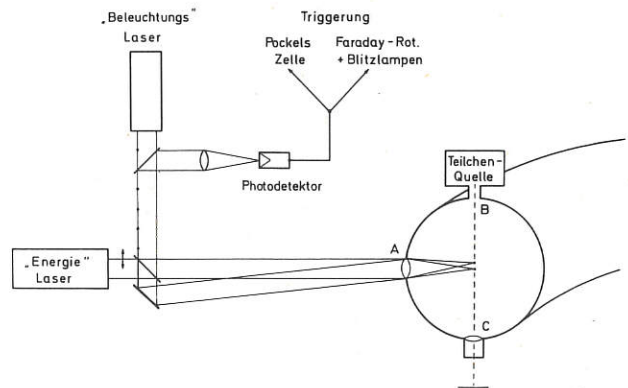


Abb. 7: Triggerung des Energie-Lasers an WIIb

signal für den Laserstrahl wird erzeugt, wenn sich das Teilchen direkt im Fokus befindet. In einem Simulationsexperiment wurde die Triggerung (Dunkelfeldtriggerung) mit dem an Glaskügelchen von 500μ Durchmesser reflektierten Licht eines He-Ne-Lasers untersucht. Die Empfindlichkeit ließ sich so einstellen, daß nur von Kugeln getriggert wurde, deren Mittelpunkte innerhalb eines Kreises von $0.75 \times$ Kugelradius um den Fokuspunkt lagen. Weitere Experimente wurden an Wasserstoffpellets von $300 \mu \phi$ und 600μ Länge durchgeführt. Elektrische Signale bis zu 15 mV wurden von der Photodiode abgegeben. Als Störquelle trat dabei das Blitzlampenlicht des vom Triggersignal angesteuerten Rubinlasers auf. An der Verringerung dieser Störung wird derzeit gearbeitet.

Mit Hilfe des Rubinlasers wurden mehrere H_2 -Pellets abgeschossen (Abb. 8 – nächste Seite). Wegen der Schwierigkeiten mit den Störsignalen wurde die Triggerung in diesem Experiment durch Strahlunterbrechung eines He-Ne-Laserstrahls durchgeführt.

1.6 Vorbereitung des Experiments am WIIb

Da am Stellarator WIIb geeignete Beobachtungsfenster fehlen, um die Plasmaerzeugung zu Beginn des Laserpulses zu untersuchen, wurde ein hierzu geeigneter Versuchskessel konzipiert. Als Diagnostikmethoden sind vorgesehen: Interferometrie bei 10.6μ und im sichtbaren Wellenlängenbereich, Sondenmessungen, Kurzzeitphotographie und Spek-

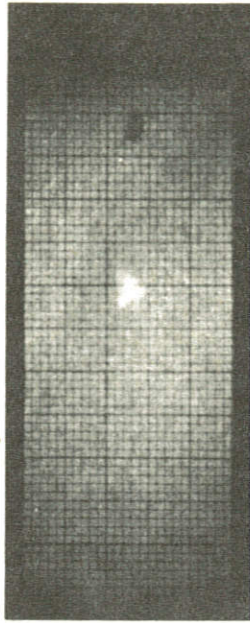


Abb. 8: Plasmaerzeugung von H_2 -Pellets mit einem Rubinlaser. Entfernung: 15 mm von der Düse.

troskopie. Außerdem soll durch Messung des transmittierten, reflektierten und gestreuten Laserlichts die vom Pellet absorbierte Laserenergie bestimmt werden.

1.7 Theorie zur Plasmaerzeugung und Expansion

Eindimensionale Berechnungen zur Frage der Wellenlänge bei Pelletheizung

Um den Einfluß der Laser-Wellenlänge auf die Heizung von Wasserstoff-Eis-Pellets zu prüfen, wurden eindimensionale numerische Berechnungen (ebenes Modell) durchgeführt. Als Absorptionsmechanismus wurde inverse Bremsstrahlung (Stoßabsorption) angenommen. In diesem Modell wird die Wellenenergie nur in Plasmaschichten mit Elektronendichten unter einem „kritischen“ Dichtewert absorbiert. Die absorbierte Energie wird von der Absorptionszone mittels Stoßheizung und nichtlinearer Wärmediffusion weitergeleitet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigen die Notwendigkeit, den Abbau der Festkörperdichte bzw. die Heizung des Pellets bei der kürzestmöglichen Wellenlänge anzufangen.

● Zweidimensionale Berechnungen zur Heizung und Expansion von lasererzeugten Plasmen

Für die Untersuchung der zeitabhängigen Vorgänge, die bei Füllung von magnetischen Einschlußmaschinen mit lasererzeugten Plasmen auftreten (Heizung und Kompression des Pellets, Expansion und Rekombination des Plasmas), und damit für die Optimierung der Laser-Pellet-Parameter (Pellet und Strahldurchmesser in Abhängigkeit von Laserpulsenergie und Pulsdauer), wurde ein zweidimensionales numerisches Rechenprogramm entwickelt. Die Verwendung von verallgemeinerten Langrangschen Koordinaten in dem Programm ermöglicht die Anwendung auf beliebige rotationsymmetrische Probleme. Typische Rechenergebnisse sind in Abb. 9 gezeigt. Ein flaches Deute-

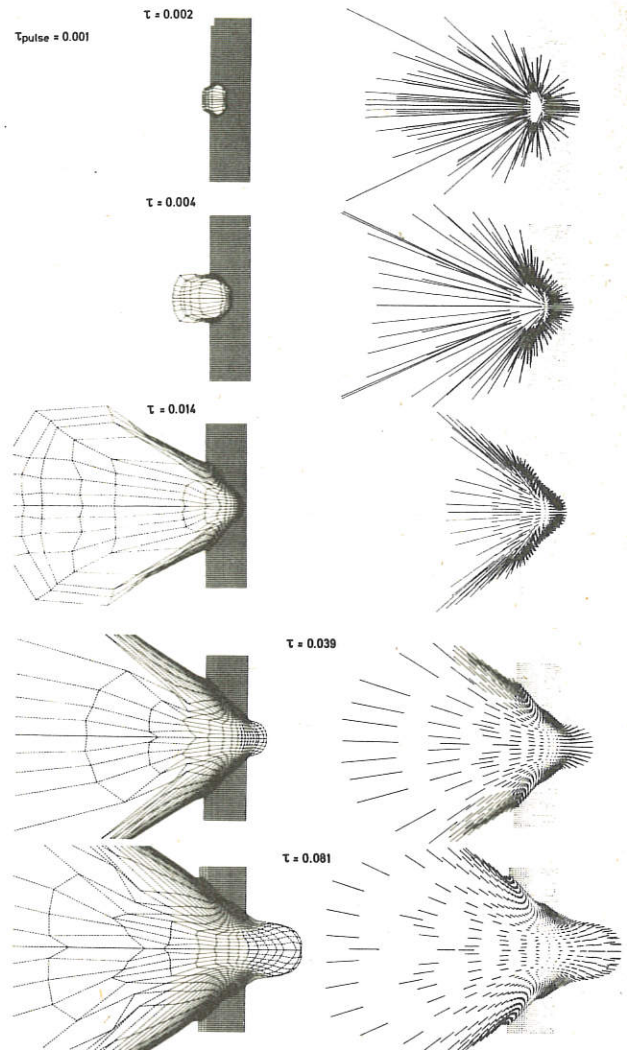


Abb. 9: Kraterbildung und Plasmaexpansion bei Laserbestrahlung von Deuteriumeis (Ergebnisse von numerischen Berechnungen). Links: Dynamik der Stoßkompression und Plasmaexpansion, rechts: Geschwindigkeitsvektordiagramme.

rium-Eis-Pellet wird von einem Laserstrahl, dessen Durchmesser $\frac{1}{8}$ des Pelletdurchmessers ist, von links bestrahlt ($\Phi \approx 5 \times 10^{12}$ W/cm², Pellet-Dicke $\approx 100 \mu$, Pulsdauer ≈ 3 ns). Die Zeiten τ sind in Bruchteilen von 100 ns gegeben. Die Kraterbildung und die Dynamik der Plasmaexpansion sind auf den Bildern verfolgbar. Die Strich-Bilder in der rechten Spalte sind Vektorplots der jeweiligen Geschwindigkeitsverteilungen. Die verschiedenen berechneten Größen (Stoßfrontgeschwindigkeit, Plasmageschwindigkeit, usw.) stimmen mit analytisch berechneten und gemessenen Werten gut überein.

1.8 Begleitexperimente

Untersuchung der Expansion von lasererzeugten Plasmen von Polyäthylen-Pellets (siehe IPP 4/125 v. K. Büchl und T. Haering)

Aus Untersuchungen von Haught und Polk*) ist die Ex-

*) J. T. Woo, W. J. Fader, D. H. Polk, A. F. Haught, United Aircraft Res. Lab., Final Report May 1974, AD 781 127

pansion von lasererzeugten Plasmen von 10–50 μ Pellets bekannt.

1. Die Expansion ist symmetrisch.
2. Das gesamte Pellet wird in Plasma umgewandelt.
3. Die Plasmaerzeugung läßt sich durch das Ähnlichkeitsmodell mit gleichmäßiger Aufheizung des Pellets beschreiben.

Unser Ziel war die Untersuchung der Expansion von lasererzeugten Plasmen von 200 μ Pellets. Die Ergebnisse sind:

1. Die Expansion ist unsymmetrisch in Richtung auf den Laser (Abb. 10).
2. Es werden nur ca. 10% des Pellets in Plasma umgewandelt.
In unserem Experiment werden nur etwa 2–6% der Laserenergie absorbiert.
3. Die Plasmaerzeugung läßt sich durch das Ähnlichkeitsmodell genähert beschreiben, wenn man die absorbierte Energie kennt und wenn man statt der gesamten Pelletmasse nur einen Bruchteil einsetzt. Dieser Bruchteil der Pelletmasse ist abhängig von den experimentellen Bedingungen.

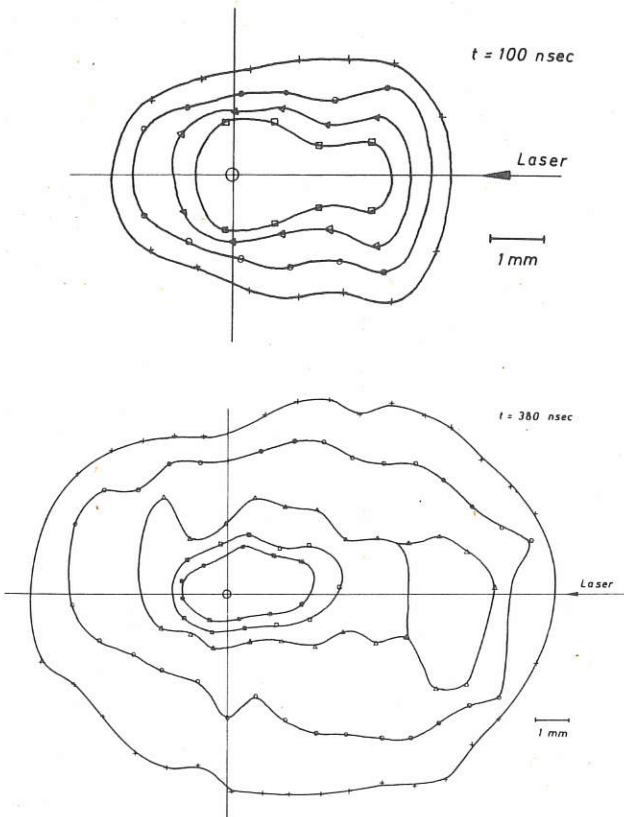


Abb. 10: Flächendichteprofile von CO_2 -lasererzeugten Plasmen von Polyäthylenpellets.

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 11 angegeben. Zur Plasmaerzeugung wurde ein CO_2 -Laser benutzt. Die maximale Leistungsdichte im Fokus betrug 10^{10} W/cm². Die Dichte wurde mit Hilfe eines Mach-Zehnder-Interferometers bestimmt. Die Polyäthylen-Pellets wurden an Glasfäden von ca. 30 μ Durchmesser aufgehangen.

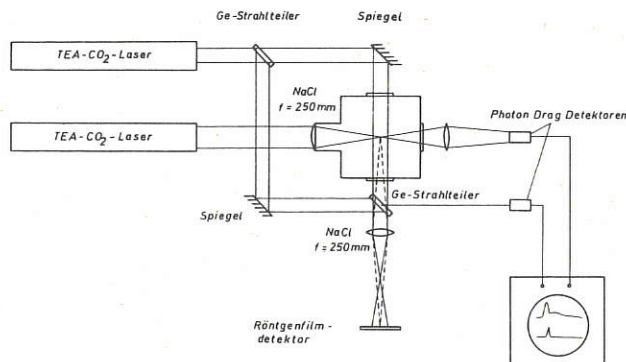


Abb. 11: Experimenteller Aufbau zur interferometrischen Messung der Plasmaexpansion.

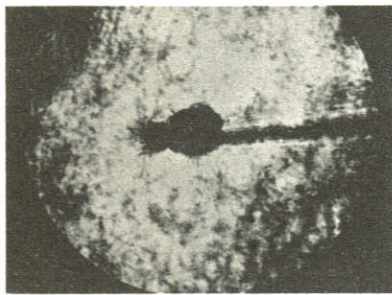
● Untersuchung der Pelletexpansion bei Bestrahlung mit einem Neodymlaser*)

Theoretische Berechnungen legen zur Füllung von Stellaratoren mit lasererzeugten Plasmen eine Doppelimpulsmethode nahe. Ein erster Laserimpuls möglichst kurzer Wellenlänge soll das Pelletmaterial verdampfen und zumindest teilweise ionisieren. Erreicht die expandierende Plasmawolke die einer zweiten Laserstrahlung entsprechende cut-off-Dichte, soll mit einem zweiten energiereichen Laserimpuls das Plasma vollionisiert und homogen aufgeheizt werden. Um optimale Bedingungen für die Absorption des Energieimpulses herstellen zu können, wurden Experimente an Polyäthylen-Kugeln von 200 μ Durchmesser mit einem Neodymlaser ausgeführt. Die Polyäthylen-Kugeln wurden an dünnen Glasfäden (ca. 30 μ Durchmesser) aufgehängt. Zur Diagnostik wurde die von S. Ariga entwickelte Kurzzeitschattenphotographie (5 psec Belichtungszeit) verwendet. Das Pellet zerbarst bei kurzzeitigen Laserimpulsen (5 nsec) in viele kleine und kleinste Bruchstücke aus festem Material (Abb. 12a). Der Laserstrahl kommt von rechts, wo im Bild die Projektion des Glasfadens zu sehen ist. Der Querschnitt des Laserstrahles am Ort des Pellets ist größer als der Pelletquerschnitt. Da eine Wolke von Mikropellets, wie sie mit 5 nsec-Impulsen der verschiedensten Energien (1 bis 20 Joule) erzeugt wird, als Target für einen Energieimpuls nur wenig geeignet ist, wurden ebenfalls Experimente mit längeren Laserimpulsen (50 nsec) gemacht. Dabei ergab sich die Tendenz, daß die homogene Komponente (Gaswolke) zu- und die Partikelkomponente abnahm (Abb. 12b). Weitere Experimente mit langen Laserimpulsen und insbesondere mit Wasserstoffpellets sind notwendig, um optimale Vorpulse für die Plasmaerzeugung zu finden.

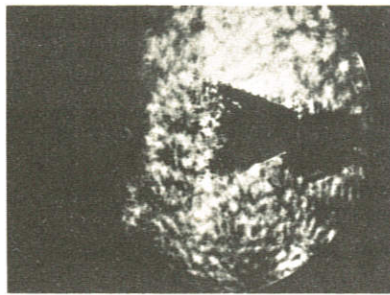
● Wechselwirkung Laserstrahlung – Wand

Im Treffpunkt von fokussiertem Laserstrahl und Pellet ist der Durchmesser des Fokus etwa doppelt so groß wie der des Pellets. Das bedeutet, daß zu Beginn des Laserimpulses – und später, wenn das expandierte Plasma für die Laserstrahlung wieder transparent ist – ein großer Teil des Laserlichts auf die dem Fenster gegenüberliegende Wand

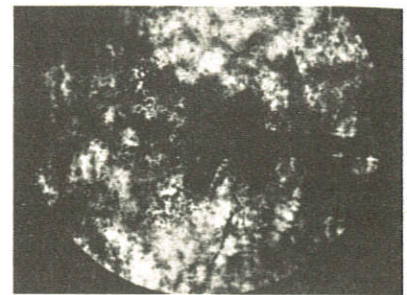
*) In Zusammenarbeit mit der Projektgruppe Laserfusion



0 nsec

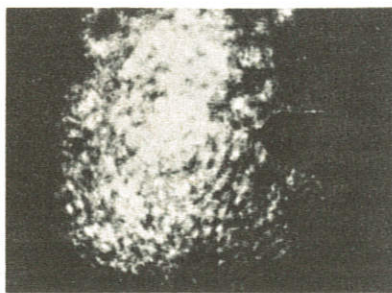


270 nsec

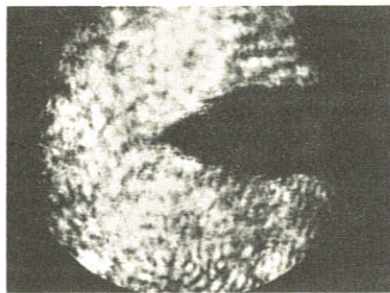


350 nsec

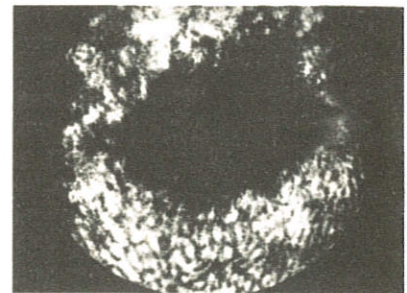
Abb. 12 a: Expandierendes dichtes Material von Polyäthylenpellets, Nd-Laser 5 nsec, 1 J



0 nsec



30 nsec



280 nsec

Abb. 12 b: Expandierendes dichtes Material von Polyäthylenpellets, Nd-Laser 50 nsec, 12 J

des Stellarators trifft. Unter den experimentellen Bedingungen an WIIb ist bei einer Wandbelastung von 10 J/cm^2 damit zu rechnen, daß verdampfendes Wandmaterial bzw. von der Wand desorbiertes Gas das Plasma verunreinigt.

Um dies zu untersuchen, wurde eine UHV-Apparatur aufgebaut, in der die im Stellarator erwarteten Bedingungen simuliert werden können. Die untere Nachweisgrenze für desorbiertes Material liegt mit 10^{15} Teilchen um 3 Größenordnungen über der Teilchenzahl im Pellet. Erste mit einem CO_2 -Laser gewonnene Ergebnisse liegen vor.

2. CO_2 -LASER-ENTWICKLUNG

(H. Brinkschulte, H. Baumhacker, E. Fill, R. Lang, W. Schmid, A. Wasner, F. Zitzmann)

Die Entwicklung des gepulsten CO_2 -Hochleistungslasers, der für die Erzeugung von Plasma durch fokussiertes Laserlicht eingesetzt werden sollte, wurde Ende Juli 1974 abgeschlossen. Die wesentlichen Komponenten des Systems sind der Oszillator, der einen Puls mit der geforderten Pulslänge von ca. 1 ns erzeugt, und drei folgende Verstärkerstufen, in denen der relativ schwache Oszillatorpuls auf die gewünschte Ausgangsenergie gebracht wird. Im Oszillator und ersten Verstärker wird das Lasergas in selbständi-

gen Entladungen angeregt. Bei den beiden Endverstärkern werden unselbständige, durch einen ins Lasergas injizierten Elektronenstrahl kontrollierte Entladungen eingesetzt.

Es wurden Verbesserungen am Oszillator durchgeführt und durch umfangreiche Messungen der Kleinsignalverstärkungsfaktoren an den drei Verstärkerstufen deren Lasereigenschaften bestimmt. Ein wesentlicher Teil der Arbeiten galt der Auffindung des optimalen Strahlengangs für das Gesamtsystem. Mit Hilfe des von uns noch entwickelten, aber nicht mehr zum Einsatz gekommenen Mehrlinienoszillators könnte die Ausgangsenergie des Lasers weiter erhöht werden.

2.1 Oszillator und Pulselektionssystem

Es wurde versucht, mit Hilfe der Methode der passiven Modenkopplung den Oszillatorpuls, der im freilaufenden Betrieb etwa 100 ns lang ist, zu verkürzen. Es gelang, Pulse mit einstellbarer Dauer zwischen 1 und 6 ns zu erzeugen¹⁾. Dabei war die maximale Energie pro ns-Puls mit 30 mJ etwa 3mal so groß wie bei dem — im Jahresbericht 1973 bereits beschriebenen — Oszillator mit aktiver Modenkopplung. Allerdings wurde der Oszillator im Gesamtsystem wegen der besseren Reproduzierbarkeit und wegen des geringeren Jitters mit aktiver Modenkopplung eingesetzt.

Beim Pulselektionssystem wurde das Selektionsverhältnis — das ist die Energie des separierten Pulses zur Ge-

¹⁾ H. Baumhacker, H. Brinkschulte, E. Fill, R. S. Lang: TEA- CO_2 -Oszillatoren zur Erzeugung von 1 ns-Pulsen im Einlinien-, Mehrlinien- und Zweibandbetrieb, IPP 4/121

samtenergie der Vorpulse – verbessert. Durch einen zusätzlichen Polarisator und einen erweiterten Analysator (8 Germaniumscheiben unter dem Brewsterwinkel statt bisher 4) konnte ein Selektionsverhältnis von 700:1 erreicht werden.

2.2 Verstärker I

Der erste Verstärker besteht aus fünf Doppelentladungen, die hintereinander in einem Plexiglasrohr angebracht sind. Alle Entladungen werden gleichzeitig getriggert, wobei der Jitter für den Einsatz der Entladungen kleiner als 50 ns ist. Der Elektrodenabstand beträgt 5 cm und die gesamte aktive Länge 225 cm. Bei einem in der Mitte der Entladung gemessenen Kleinsignalverstärkungsfaktor von 0.027 cm^{-1} folgt somit für den Verstärker I eine Kleinsignalverstärkung von 430.

2.3 Verstärker II

In diesem Verstärker wird das Lasergas bei Atmosphärendruck durch eine elektronenstrahlkontrollierte Entladung gepumpt. Die Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten **Daten der Elektronenkanone und der Laserentladung**:

Beschleunigungsspannung:	150 kV
Kathodenstrom:	150 A
Impulsdauer:	$5 \mu\text{s} - 10 \mu\text{s}$
Stromdichte (Laserseite):	33 mA/cm^2
Energie der Elektronen (Laserseite):	115 keV
Entladungsvolumen:	$10 \times 10 \times 100 \text{ cm}^3 = 10 \text{ dm}^3$
Feldstärke über Druck:	$5 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{atm})$
Ladespannung des Kondensators:	50 kV
Kapazität des Kondensators:	$9,2 \mu\text{F}$
Entladungsstrom:	8 kA
Entladungsstromdichte:	8 A/cm^2
Widerstand des Entladungsplasmas:	$6,25 \Omega$
Elektronendichte:	$1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
Dissipierte el. Energie:	2 kJ

Einen Eindruck von der Homogenität des Elektronenstrahls vermittelt Abb. 13. Hier wurde die Laserkanone entfernt und das Leuchten der Luft über der Elektronenkanone fotografiert. Das Leuchten, das einen bläulichen Farbton hat, erscheint über die ganze Kathodenlänge gleichmäßig.

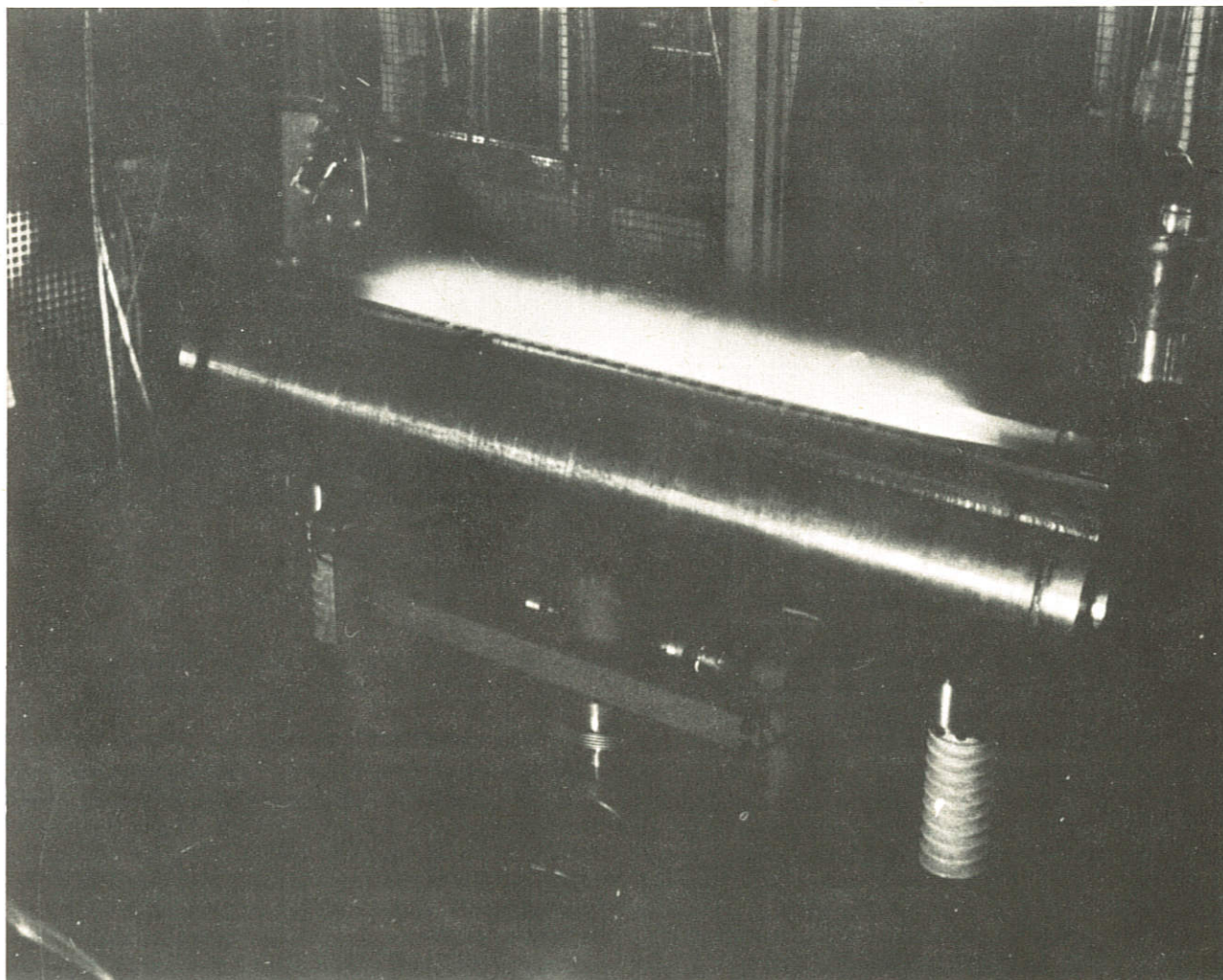


Abb. 13: Ionisation der Luft durch Elektronenkanone.

Um einen optimalen Einsatz des Verstärkers im Gesamtsystem zu gewährleisten, wurden zahlreiche Gasentladungs- und Laserparameter gemessen. Besonderer Wert wurde auf die Messung der Kleinsignalverstärkung V gelegt, deren Koeffizient g_0 ein Maß für die im Verstärker gespeicherte Laserenergie ist. Abb. 14 ist ein typisches Oszillogramm für den Entladungsstrom (oben) und die Verstärkung V (unten) eines auf der P (20)-Linie schwingenden kontinuierlichen CO₂-Lasers. Die maximale Verstärkung ist 27, entsprechend einem g_0 von 0.033 cm⁻¹. Aus der zeitlichen Zuordnung von Entladungsstrom und Verstärkung folgt der optimale Zeitpunkt für den Oszillatorkurs.

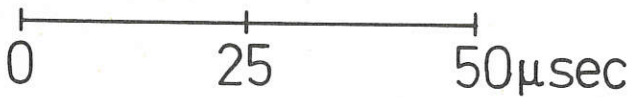
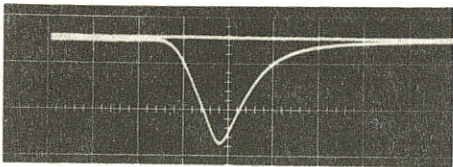
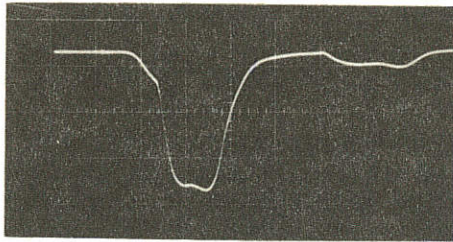


Abb. 14: Strom (oben) und Verstärkung für die Linie P(20) (unten) in der Mitte der elektronenstrahlkontrollierten Entladung.

Zusätzlich wurden Messungen von g_0 über den Verstärkerquerschnitt gemacht. Während $g_0(x)$ — d. h. senkrecht zur Entladungsrichtung — nahezu konstant war, ergab sich bei $g_0(y)$ eine erhebliche Zunahme von der Kathode zur Anode (Abb. 15). Dies muß auf die ungenügende Reichweite der Primärelektronen zurückgeführt werden, wodurch im Bereich der Anode die Feldstärke und damit die dissipierte Energie erhöht wird.

Zur Optimierung des Verstärkers wurde die Pulslänge, die Speicherkapazität und das Gasmischungsverhältnis variiert. Abb. 16 zeigt g_0 als Funktion der je Volumeneinheit in das Lasergas eingespeisten Energie e . Parameter sind die Gasmischung und der Energiespeicherkondensator. Es zeigt sich, daß die Gasmischung 71:6:23 die höchsten Verstärkungswerte ermöglicht.

2.4 Verstärker III

Im dritten Verstärker wird das Lasergas — ebenso wie im zweiten — bei Atmosphärendruck in einer elektronenstrahlkontrollierten Entladung angeregt. Das aktive Volumen beträgt 10 l, in dem eine elektrische Energie von 1.5 kJ dissipiert wird. Bei einer Eingangsenergie von mehr als 2 J arbeitet dieser Verstärker im Sättigungsenergiebereich und addiert weitere 10 J Laserenergie.

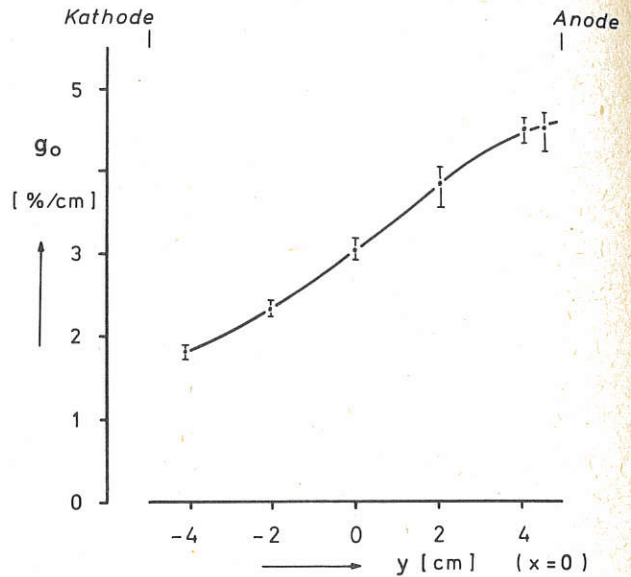


Abb. 15: y-Abhängigkeit des Koeffizienten der Kleinsignalverstärkung in der elektronenstrahlkontrollierten Entladung.

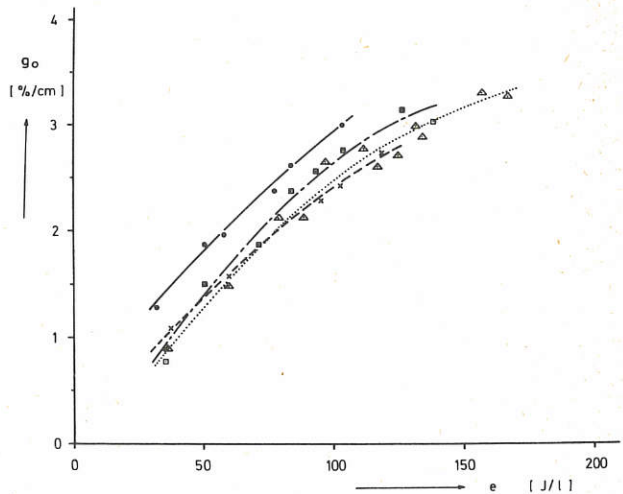


Abb. 16: Kleinsignalverstärkungsfaktor als Funktion der dissipierten Energiedichte.

$XC=9.2 \mu F$; He-CO₂-N₂=3-1-1

□ 5.2 μF 3-1-1

□ 5.2 μF 3-1-1+Tripropylamin

○ 5.2 μF 3-1-1/4

2.5 Aufbau des Gesamtsystems

Der Strahlengang für optimale Ausgangsenergie ist in Abb. 17 dargestellt. Dabei wird der Oszillatorkurs nach Durchgang durch den ersten Verstärker VI über die Spiegel M1 und M2 in den zweiten Verstärker EKI gespiegelt, von M3 durch den gleichen Verstärker zurückgeleitet und nach Umlenkung durch den Spiegel M4 schließlich im letzten Verstärker EKII auf seine Ausgangsenergie gebracht. Die mit SF₆ gefüllte Zelle zwischen Oszillator und VI verbessert das Selektionsverhältnis (= Verhältnis der Energie des selektierten Oszillatorkurses zu der Summe der Energie der

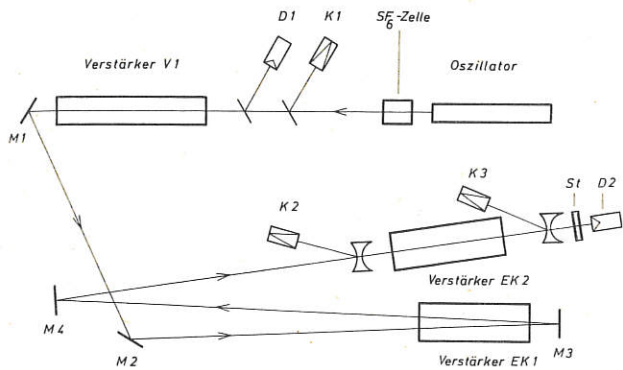
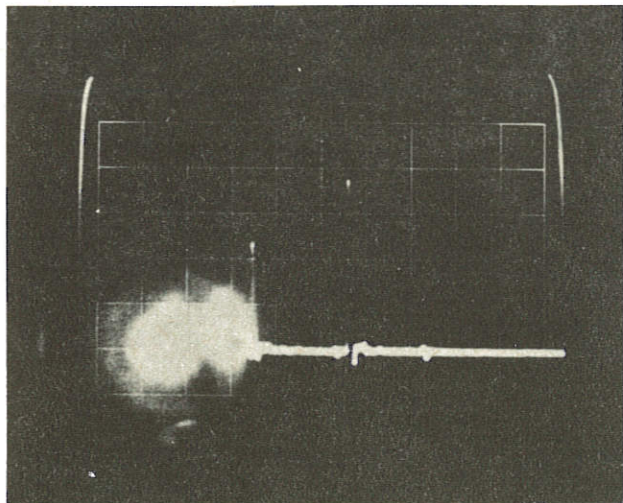


Abb. 17: Strahlengang für das Gesamtsystem.

– unerwünschten – Vor- und Nachpulse) und verhindert ein Anschwingen des Gesamtsystems. Die Länge des Strahlengangs beträgt etwa 45 m. Die Divergenz des Oszillatorstrahls ist so groß, daß dessen Querschnitt nach 45 m Wegstrecke auf den des letzten Verstärkers aufgeweitet wird. An mehreren Stellen des Systems werden gleichzeitig bei jedem Schuß Energie und Pulsform des Laserpulses gemessen. Abb. 18 zeigt ein Oszillogramm mit der Pulsform hinter



500 ns

Abb. 18: Pulsform am Eingang (vorderer Spike) und am Ausgang der Verstärkernetze (zweiter Spike).

dem Oszillator (erster Spike) und hinter dem letzten Verstärker (zweiter Spike). Hieraus ist zu ersehen, daß die gesamte Ausgangsenergie in einem einzigen Puls erscheint.

2.6 Zusammenfassung der Daten des Gesamtsystems:

- Der Oszillatorpuls mit einer Energie von 10 mJ wird im ersten Verstärker auf 0.5 J verstärkt. Nach doppeltem Durchgang durch den zweiten Verstärker beträgt die Energie 20 J, zu der der letzte Verstärker weiter 10 J addiert. (Bisher wurde eine maximale Ausgangsleistung von 20 J hinter dem zweiten Verstärker gemessen.)

- Die Pulslänge ist 1.3 ns.
- Der Laser emittiert auf der Linie P (20) im 001-100 Band bei einer Wellenlänge von 10.59 μ .
- Die Divergenz beträgt 2 mrad.
- Der Gesamtwirkungsgrad, d. h. das Verhältnis von Laserenergie zu der in sämtlichen Entladungen dissipierten, ist ca. 1% und damit rund eine Größenordnung höher als bei vergleichbaren Gaslasern.

2.7 Oszillator mit Mehrlinien- und/oder Zweibandbetrieb

Die Extraktion der in den Verstärkern gespeicherten Energie mit Eingangspulsen der Dauer von ca. 1 ns wird verbessert, wenn dieser auf mehreren Rotationsschwingungsübergängen des 9,4 μ m-Bandes und/oder des 10,4 μ m-Bandes emittiert. Es wurden zwei Verfahren zur Erzeugung von Mehrlinien-Mehrbandemission entwickelt.

- Bei Zusatz von NH_3 zum Lasergas emittiert der (in diesem Falle freilaufende) Oszillator auf mehreren Übergängen, wie in Abb. 19 dargestellt. Es zeigte sich, daß 12–13 Torr NH_3 , entsprechend 1000–1100 Torr x cm, für den Laserbetrieb optimal ist. Hierbei emittiert der Oszillator gleichzeitig auf drei Linien mit den Rotationsquantenzahlen $J = 19, 21$ und 23.

- Bei dem zweiten im IPP Garching entwickelten Verfahren wurde eine Zelle mit dem selektiv absorbierenden Gas n-Butan (C_4H_{10}) in den Resonator des aktiv modenkoppelten Oszillators gebracht / 10 /. Durch die selektive Absorption des Gases können jetzt die optischen Verluste in den Rotationsschwingungsübergängen des 10,4 μ m-Bandes so eingestellt werden, daß gleichzeitig mehrere Linien sowohl des 9,4 μ m- als auch des 10,4 μ m-Bandes anschwingen. Es wurde beobachtet, daß der Oszillator gleichzeitig bis zu vier Linien P (16) bis P (22) im 9,4 μ m-Band und P (18) bis P (24) im 10,4 μ m-Band emittierte.

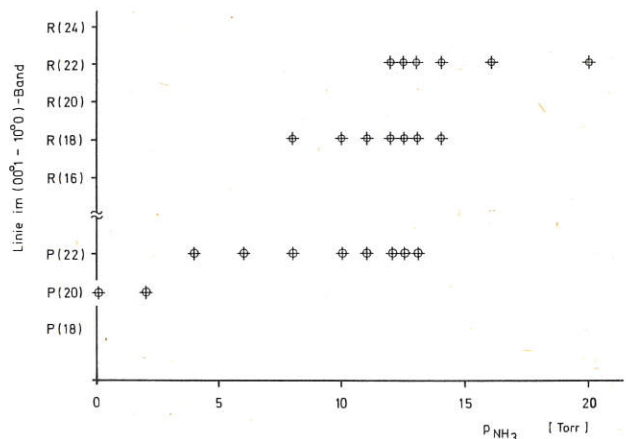


Abb. 19: Emissionslinien in Abhängigkeit von der dem Lasergas zugeetzten NH_3 -Menge.

Durch den Mehrlinien-Zweibandbetrieb wird die Qualität der Modenkopplung nicht beeinträchtigt. Die Energie des größten Einzelpulses im Mehrlinien-Zweibandbetrieb beträgt ca. 18 mJ bei 1,2 ns Pulsdauer.

3. REAKTORELEKTROTECHNIK

(A. Knobloch, C. van der Klein, H. Lohnert, A. Martinelli, M. Pillsticker, M. Söll)

Die bisher in der Gruppe Magnetfeldtechnik durchgeführten Arbeiten wurden ab Oktober 1974 im Projekt *Reaktor-elektrotechnik*, welches thematisch die Technologien der elektrischen Systeme für Plasmaeinschließung und -heizung umfaßt, bearbeitet. Die Schwerpunkte des Programms im Berichtsjahre waren die Ermittlung des Betriebsverhaltens der W VII-Prototypspule, die Untersuchungen an Supraleitungsschaltern mit thermischer und Stromtriggerung sowie die vorbereitenden Arbeiten für überkritische Kühlung von Supraleiterproben. Hinzu kamen Bestrahlungsexperimente an Supraleitern und vorbereitende Arbeiten für die Bestrahlung von Isolierstoffen.

Ende des Jahres wurde ein weiterführender Programm-vorschlag für die Arbeiten auf dem Supraleitungsgebiet un-

In Abänderung zu dem beim Hersteller angewandten Abkühlverfahren wurde der SL-Magnet erstmalig mit Kaltgas und Flüssighelium aus einem Vorratsgefäß abgekühlt. Die Abkühlzeit betrug 11 h, und es wurden rund 460 ltr. flüssiges Helium benötigt (Abb. 21). Der Quenchstrom der Spule betrug 908 A (91% des gemessenen Kurzprobenwertes vom benutzten Supraleiter), wobei 1,8 MJ Energie magnetisch gespeichert waren. Die Spule hielt den geforderten elektrischen und mechanischen Beanspruchungen stand. Die Helium-Verlustmessungen ergaben dreifach höhere Werte, als der Hersteller angegeben hatte, was auf die institutsbedingten veränderten Betriebsbedingungen des kryogenischen Teiles des Magneten zurückgeführt werden kann. Um den Betrieb des Magneten als technisch zuverlässiges Gerät zu ermöglichen, müssen mehrere Veränderungen am Kryosystem erfolgen.

Die Testergebnisse und die sich daraus ergebenden Konsequenzen sind im IPP-Bericht 4/120 festgehalten.

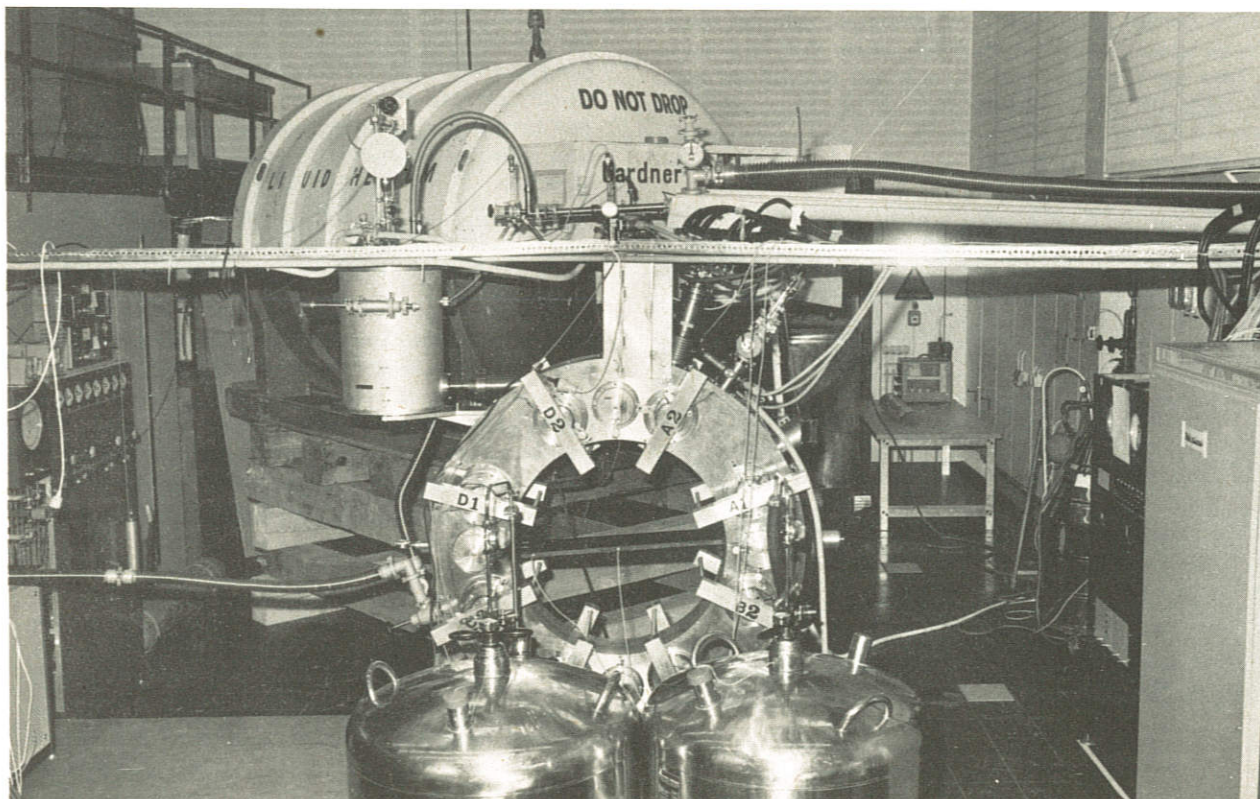


Abb. 20: Versuchsaufbau für Messungen am W VII-Prototyp-Magnet

ter Einschluß der in Aussicht genommenen Kooperation mit dem IEKP III (GfK Karlsruhe) vorgelegt.

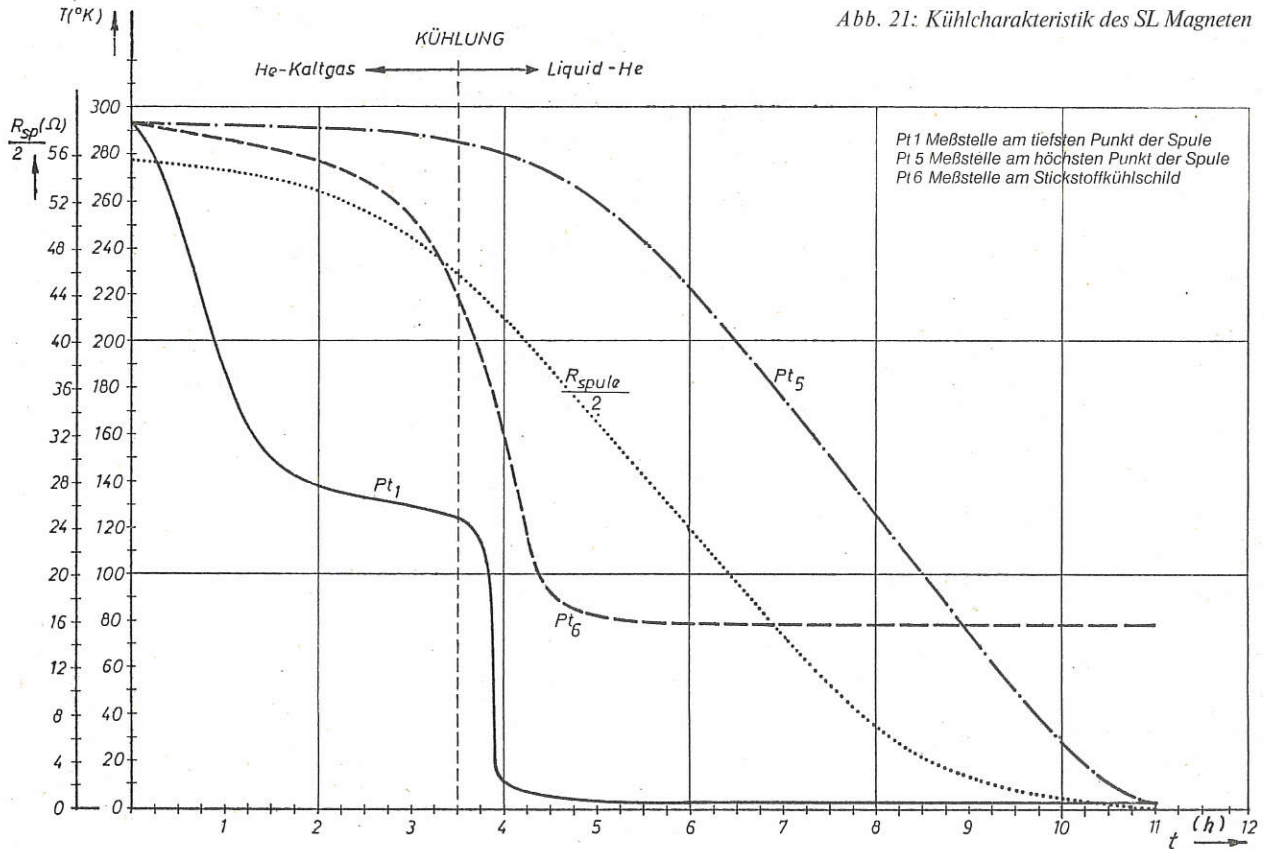
3.1 Messungen am W VII-Prototyp-Magnet

Nach Beendigung der notwendigen Installationsarbeiten (Abb. 20) konnte der SL-Prototyp-Magnet in Garching erstmalig in Betrieb genommen werden. Im Rahmen eines für den Magneten geplanten Experimentierprogramms wurde zunächst ein Einzeltest vorgenommen. Dabei sollten die vom Hersteller gemessenen und bekannten Daten bei geringfügig geänderten Betriebsbedingungen überprüft und mögliche versteckte Transportschäden festgestellt werden.

3.2 Vorbereitung zum Betrieb der W VII-Prototyp-Spule unter Stellarator-Bedingungen

Um die supraleitende Prototypspule unter Stellarator-Bedingungen zu testen, wurden zwei das Hauptfeld simulierende wassergekühlte Spulen dimensioniert und gebaut. (Abmessungen: Außendurchmesser 1600 mm, Innendurchmesser 880 mm, Dicke 200 mm). Die Verlustleistung von 3 MW je Spule kann nur durch intensive Kühlung erreicht werden (192 parallele Kühlkreise). Die Spulen wurden so bemessen, daß mit der verfügbaren Dauerleistung am Innenrand der SL-Spule eine max. Feldstärke von etwa 6,7 T erreicht wird. Dieser Wert entspricht dem B_{max} in einer Torusanordnung.

Abb. 21: Kühlcharakteristik des SL Magneten



Ferner ist es notwendig, den Einfluß der transienten helischen Felder auf die SL-Spule zu untersuchen. Zur Nachbildung der gepulsten Helixfelder wurden vier Spulen am Innenrand der SL-Spule angeordnet. Als Stromversorgung wurde eine Kondensatorbatterie (15 kV, 140 kJ) aufgebaut. Kapazität und Induktivität der Spulen wurde so bemessen, daß die der Helix entsprechende Feldstärke von 5 kG mit einer Anstiegszeit von 5 ms erreicht wird. Auf diese Weise wird mit geringem Aufwand eine hinreichende Simulation erreicht.

3.3 Untersuchungen an SL/NL-Abschaltern (Kryoions)

Die Untersuchungen haben die Entwicklung eines SL/NL-Abschalter-Prototyps zum Ziel. Mit dem Schalter sollen schnelle Stromkommutierungen aus supraleitenden Netzwerkszweigen in ohmsche Verbraucher vorgenommen werden. An einem mäanderförmig aufgebauten Schalter erzielte günstige Ergebnisse bei **Auslösung mit Strompulsen** gaben Veranlassung, weitere Experimente mit verbesserten Schaltern vorzunehmen. Doppelt bifilare Schalterspulen in pan-cake-Form, hergestellt aus dünnen supraleitenden Drähten (0,28 mm ϕ), haben sehr niedrige Induktivitäten, so daß sich günstige Voraussetzungen für schnelle Abschaltungen ergeben. Mehrere Supraleiter konnten parallel betrieben werden, so daß Quenchströme von 860 A erreicht wurden. Bei Belastungsströmen $I_0 = 750$ A und einer von den Pulscondensatoren C_B gespeicherten Energie von 2 Ws, die innerhalb einer Pulsdauer von 10 μ s bereitgestellt werden konnte, wurden Kommutierungszeiten zwischen 300 und 400 ns gemessen. Die Zuleitungsinduktivitäten L_{zu} bewirkten am Schalter dann eine Spitze-Spitze-Spannung von ca.

1 kV. Die Möglichkeit der Schalterauslösung war bis zu sehr kleinen Strömen von I_0 gegeben und konnte noch mit 0,5 Ws Auslöseenergie (Speicherwert der Kondensatorenergie) vorgenommen werden. Die Kommutierungszeiten betragen dann 2 bis 3 μ s. Diese Werte sind identisch mit der Zeit, bei der der Schalter für $I_0 = 0$ seinen Widerstand von 0 auf R_{SN} verändert. Während der Kommutierung besteht eine Einwirkung des Pulsstromkreises auf den Hauptstromkreis, weil wegen der ungleichmäßigen Änderung von R_s in den Schaltersträngen eine wirksame Kompensation zur Verhütung der Störungen nicht möglich ist.

Als Vorbereitung zu Experimenten mit **Magnetfeldpuls-auslösung** von SL/NL-Abschaltern, bei denen der oben erläuterte Störeffekt vermieden werden kann, wurde ein Bandleitergenerator entwickelt, dessen Wellenwiderstand 0,2 Ω beträgt. Man erzielt mit dem Generator sehr steil ansteigende Stromimpulse von etwa 10 μ s Dauer und ausreichender Höhe, um ein für die Auslösung erforderliches Magnetpulsfeld erzeugen zu können. Technologische Voruntersuchungen für die Schalterherstellung (Gießverfahren und Gießharzerprobung bei 4,2 K) wurden durchgeführt, und es wurde mit der Herstellung eines Schalters begonnen.

3.4 Stabilitätsverhalten von Supraleitern aus NbTi-Filamentleitern im überkritischen Helium

Eine entscheidende Bedeutung beim Bau großer supraleitender Magnete sind Kühlmedium und Kühlmethode. Kühlung mit überkritischem Helium würde im Hinblick auf den Spulenaufbau einige entscheidende Vorteile gegenüber der Badkühlung bringen. Eines der noch zu untersuchenden Probleme bei der Kühlung mit überkritischem Helium ist

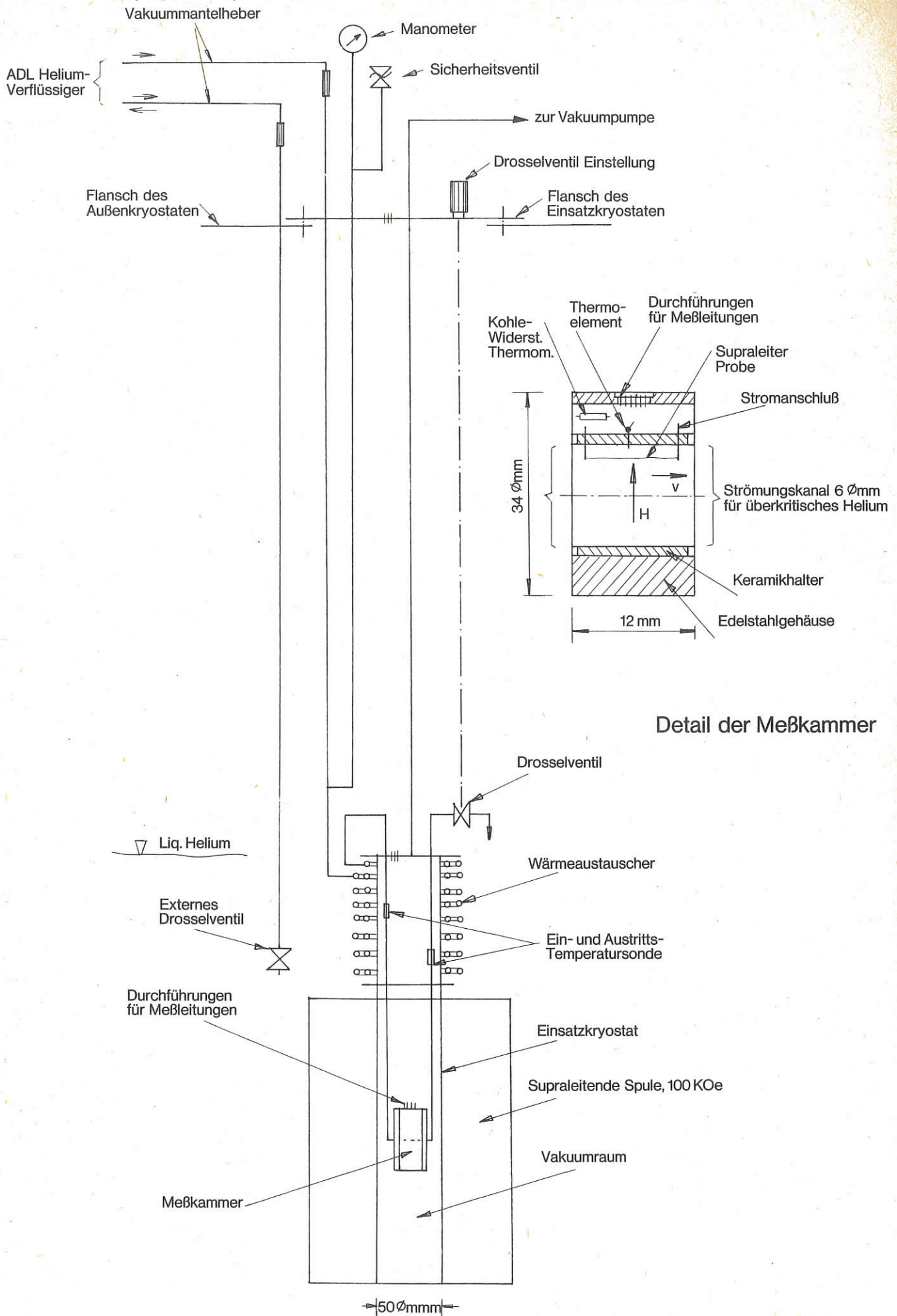


Abb. 22: Schema der Versuchsanordnung für Stabilitätsuntersuchungen an Supraleitern in überkritischem Helium.

das Stabilitätsverhalten von Supraleitern, das aus dem Verlauf des Widerstandes in einem blanken Filament bei Strömen $> J_c$ ersichtlich ist.

Um diese Untersuchungen durchführen zu können, wurde eine dafür geeignete Apparatur gebaut, die in einer supraleitenden 100 kOe Spule eingebaut werden kann.

3.5 Tieftemperaturneutronenbestrahlung von Nb₃Sn

Neben NbTi ist Nb₃Sn wegen der günstigen supraleitenden Eigenschaften zur Erzeugung von Magnetfeldern für den Plasmaeinfluß von Bedeutung. Da der Supraleiter in Fusionsreaktoren schnellen Neutronen ausgesetzt sind, wurden auch an Nb₃Sn Neutronenbestrahlungen bei 4.6 K durchgeführt. Dabei wurde das Verhalten der kritischen Stromdichte j_c und der kritischen Temperatur untersucht. Es wurden Nb₃Sn-Drähte verwendet, die vor der Bestrahlung eine kritische Stromdichte j_c von 2×10^5 A/cm² bei 4.2 K und bei einem Magnetfeld von 5 T aufwiesen.

Nach einer Dosis von 3.9×10^{18} n/cm² ($E > 0.1$ MeV) zeigte sich eine Zunahme von j_c um den Faktor 2.5, verglichen mit den Werten vor der Bestrahlung. Durch Erwärmen der Proben auf 250 K nach Bestrahlung nahm die Stromtragfähigkeit wieder ab.

Die kritische Temperatur, die vor der Bestrahlung bei 17.95 K lag, zeigte nach einer Dosis von 3.0×10^{18} n/cm² einen Wert von 17.10 K. Eine weitere T_c-Reduktion auf 16.85 K wurde durch Erwärmen auf 250 K festgestellt.

4. SYSTEMSTUDIEN

(J. Raeder, R. Bünde, W. Dänner)

4.1 Blanket-Technologie

Die bereits 1972 begonnenen Studien über das Tritiuminventar von Fusionsreaktoren wurden abgeschlossen. Die Ergebnisse wurden umfassend in IPP 4/112 veröffentlicht und auszugsweise auf dem „8th Symposium on Fusion Technology“ vorgetragen / 56 /. Fortgesetzt wurden die 1973 in Angriff genommenen Arbeiten zur Schaffung von Kriterien zur Auswahl des Strukturmaterials von Blankets, in denen flüssiges Lithium zum Brüten von Tritium und zum Abtransport von Wärme verwendet wird. Die Ergebnisse wurden publiziert / 55 / IPP 4/119/.

4.2 Rechenprogramm „SYSTEMS“

Das Rechenprogramm „SYSTEMS“ wurde fertiggestellt und in IPP 4/122 dokumentiert. Mit seiner Hilfe ist es möglich, aus einer Reihe von Reaktorparametern – wie z. B. thermische Leistung, Wandbelastung – die erforderlichen Plasmadaten zu errechnen und weitere wichtige technologische Größen abzuleiten.

4.3 Auswertung der weltweiten Arbeiten über die verschiedenen Aspekte von Fusionsreaktoren

Die weltweiten Aktivitäten auf dem Gebiet der Fusionsreakorteknologie wurden verfolgt und ausgewertet. Das hieraus gewonnene Wissen wurde in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert / 45, 57 /.

Auf Vorschlag des „International Fusion Research Council“ wirkte W. Dänner bei der Verfassung eines Berichtes der IAEA in Wien über die Umweltaspekte der kontrollierten Kernfusion beratend mit./225/.

4.4 Mitarbeit in der Programmleitung des AGF-Programmes „Angewandte Systemanalyse“

Hier wurden Arbeiten zur Strukturierung einer Analyse

des Bereiches „Energie“ durchgeführt. Diese Arbeiten sind die Basis eines Projektplanes für das Energieprogramm der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen.

5. ENTWURFSTUDIEN CTRD

(A. Knobloch, W. Dänner, D. Düchs, W. Feneberg, A. Martinelli, K. H. Schmitter)

Ausgehend von früheren Diskussionen in der EURATOM-Advisory Group on Fusion Reactor Technology und auf dem IAEA Workshop on Fusion Reactor Design Problems (Culham, Februar 1974) wurde mit einem Collaborative Tokamak Reactor Design unter Mitwirkung von Culham, Garching, Jülich und Frascati begonnen. Im Mai 1974 war ein Treffen aller Beteiligten in Garching, bei dem die Hauptentwurfparameter festgelegt wurden. Wesentliche Voraussetzung hierfür waren u. a. Rechnungen mit dem IPP-Programm „Systems“.

Die Entwurfsarbeiten wurden Ende 1974 wegen Personalmangels vorläufig eingestellt. Das erarbeitete Material wird vom ehemaligen Co-ordinating Committee zusammengestellt und Interessenten in den Assoziationen zur Verfügung stehen.

Die besonders diskutierten Probleme waren eine praktisch noch nicht mögliche konsistente Ableitung der Plasma-betriebsparameter, der Alphateilcheneinfluß, das Verunreinigungsproblem und das fehlende Konzept für die Brennstoffnachfüllung. Bei der Untersuchung der Divertorfrage stellte sich heraus, daß das bundle-Konzept für den CTRD aus technischen Gründen ausscheidet. Eine für Reparatur und Wartung befriedigende Anordnung der Reaktorkomponenten wurde noch nicht gefunden. Auch das Lebensdauerproblem der ersten Wand muß erst noch systematisch in Abhängigkeit von den Betriebs- und Materialparametern erfaßt werden. Der Aufwand für die Abfuhr der erzeugten Wärme aus dem Reaktor ist bei den vorläufig sehr niedrigen Wandbelastungswerten um 2 MW/m² unverträglich hoch.

6. PLANUNG EINES EUROPÄISCHEN SUPRALEITUNGS-PROGRAMMS

(K. H. Schmitter, C. van der Klein, A. Knobloch, M. Söll)

Für die Planung eines europäischen Programmes für fusionsrelevante Supraleitungs-Technologie wurde ein deutscher Vorschlag gemeinsam mit dem IEKP der GfK Karlsruhe erarbeitet. Der Vorschlag sieht vor, die technischen Voraussetzungen für den Bau eines supraleitenden Magneten für das feasibility-Experiment stufenweise zu erarbeiten, basierend auf einem breit angelegten Grundlagenprogramm und mit dem Ziel eines integralen Demonstrationsaufbaues. In den Diskussionen des AGFRT Sub-Committee ergab sich als Konsensus unter den Vertretern der Assoziationen, daß das Ziel des Programms die Schaffung der Technologie für den feasibility-Magneten mit vollstabilisierten NbTi-Leitern sein sollte. Ein umfangreiches Grundlagenprogramm sowie ein Demonstrationsaufbau zum Nachweis der Beherrschung aller praktischen Fragen in einem vollständigen Magnetsystem wird als erforderlich angesehen. Das vom Sub-Committee vorgeschlagene Programm erstreckt sich über sieben Jahre.

Zentrale technische Einrichtungen

(Dr. Helmut Muntenbruch)

Die Zentralen Technischen Einrichtungen des IPP wurden im Oktober 1973 nach Ausgliederung der entsprechenden Arbeitsgruppen und Werkstätten aus den Abteilungen Zentrale Werkstätten, Technik und Verwaltung zusammengefaßt. Am 1. Januar 1974 und am 1. März 1974 kamen weitere Arbeitsgruppen hinzu. Seitdem werden von den Zentralen Technischen Einrichtungen (ZTE) folgende Dienstleistungen für die Projekte erbracht:

- *Versorgung der Einrichtungen und Projekte des IPP mit elektrischer Energie und mit strömenden Medien (Wasser, Gas, etc.).*

Betrieb der Energiespeichersysteme für die Stoßleistungsversorgung der verschiedenen IPP-Projekte.

Betrieb der Heizungs- und Lüftungsanlagen etc.

- *Ingenieur- und Werkstattleistungen auf den Gebieten der Elektro-, Hochspannungs- und Magnetfeldtechnik.*

- *Elektronik-Ingenieurleistungen, Entwicklung, Bau und Service von elektronischen Geräten.*

- *Konstruktion von Apparaten und Geräten (Ultrahochvakuumgefäßen, Diagnostikapparaturen, Tragkonstruktionen u. v. a.).*

Vorbereitung der Fertigung solcher Geräte in internen und externen Werkstätten.

Fertigung von Spezialapparaturen und Geräten in den Zentralen Mechanischen Werkstätten.

- *Ingenieur- und Werkstattleistungen auf den Gebieten spezieller Fertigungstechniken, der Material- und Hochvakuumtechnologie.*

- *Bearbeitung von Problemen der analytischen und präparativen Chemie, Problemlösungen der Elektrochemie, galvanische Oberflächenbehandlung, Entgiftung und Schadstoffbeseitigung.*

- *Bereitstellung von Halbzeugen, Normteilen, Bauelementen etc. in den Material-, Elektro-, Vakuumbauteile-, Film- und Gaslagern.*

- *Bereitstellung, Wieder- und Weiterverwertung von Meß- und anderen Apparaturen in einem Gerätepool.*

Gemeinsames Merkmal aller dieser Dienstleistungen ist, daß sie praktisch nicht außerhalb des IPP erbracht werden können. Gründe dafür sind u. a. mangelnde Qualitätsgarantie, lange Lieferfristen, zu geringe Vertrautheit externer Fertiger oder Lieferer mit den spezifischen Problemen der Projekte, geringe Attraktivität aufwendiger Spezialanfertigungen für die Industrie etc.

Diese Dienstleistungen werden aufgrund von Aufträgen erbracht und im Rah-

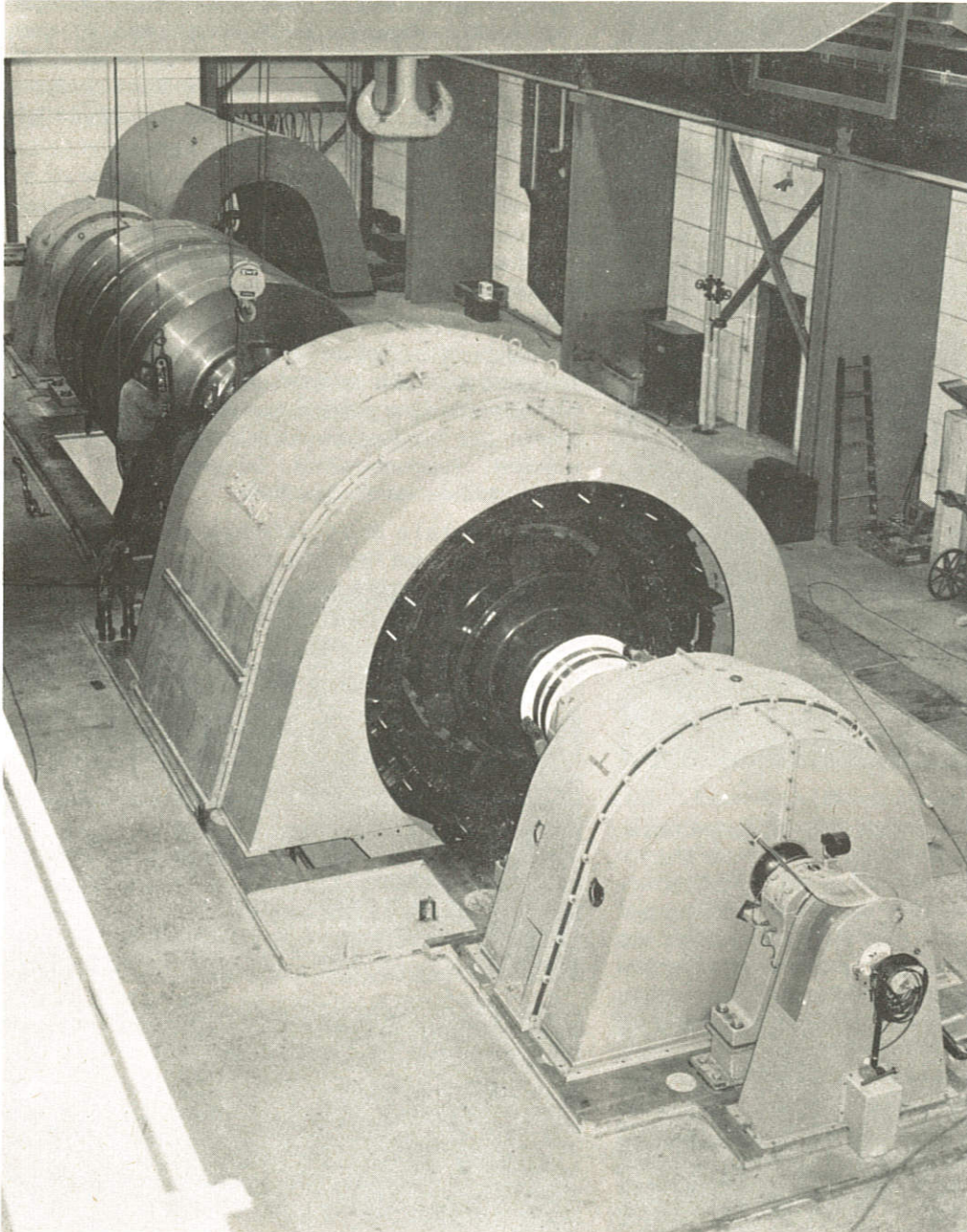


Abb. 1:
 Gesamtansicht
 des 1.45 GJ-
 150 MW-
 Schwungrad-
 generators in
 der Energie-
 zentrale EZ II.
 Gesamtlänge
 des Motor-
 Schwungrad-
 Generator-
 satzes: 22 m
 Gewicht des
 Schwunrades:
 223 t.

men der Betriebsabrechnung den Projekten bzw. Kostenträgern in Rechnung gestellt. Der „Umsatz“ der ZTE überschritt im Jahre 1974 den Betrag von 10 Mio DM.

Im Jahre 1974 wurde zur Verbesserung der Stromversorgung der Projekte ein 1.45 GJ-Stoßstromgenerator in Betrieb genommen, der größte seiner Art in Europa.

Über dem Erweiterungsbau der ZTE zur Aufnahme von Chemie, Galvanik, Kunststoffwerkstatt und von Montageflächen für Mechanik und Elektrowerkstatt konnte Ende 1974 die Richtkrone gehißt werden.

Aus vielen Dienstleistungen heben sich einige heraus, auf die in den folgenden Abschnitten besonders hingewiesen wird.

Außer der Erbringung der oben skizzierten Leistungen erfüllen die ZTE mit der Ausbildung von Feinmechanikern jährlich die Verpflichtung eines Großforschungsinstitutes zur Nachwuchsschulung.

1. ENERGIEVERSORGUNG UND BETRIEBSTECHNIK

(M. Kottmair, E. Ring)

Zusammen mit der Lieferfirma konnte die Inbetriebnahme der 1,45 GJ-Stoßleistungsanlage mit nur einer Woche Verspätung am 9. April 1974 begonnen werden. Das Vorhaben wurde zwar durch einen Isolationsschaden an der Ankerwicklung des Hauptgenerators einige Wochen unterbrochen, verlief sonst aber reibungslos und konnte bis auf die Messungen mit Last – 1974 stand der Spulensatz von W VII dafür noch nicht zur Verfügung – abgeschlossen werden.

Zusammen mit dem Bereich Technologie wurden Vorschläge für die Energieversorgung des JET erarbeitet, vor allem unter dem Gesichtspunkt der Wahl Garchings als JET-Standort.

Von der Betriebswerkstatt wurden im Jahre 1974 für Betrieb, Unterhalt und Erweiterung der allgemeinen Betriebsanlagen des Instituts und der Versorgungsanlagen des Instituts und der Versorgungsanlagen der einzelnen Experimente (u. a. Kühlwasserversorgung W VII, Umbau Gleichrichteranlage L5E) 171 Aufträge bearbeitet, bzw. abgeschlossen. 13 Facharbeiter leisteten hierzu ca. 19 500 Arbeitsstunden.

2. ELEKTRO- UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK

(M. Kottmair)

In Zusammenarbeit mit Projekten, den Gruppen Chemie, Elektronik und Technologie der ZTE und mit der Elektrowerkstatt wurden allgemeine Aufträge der Starkstromtechnik bearbeitet, z. B. Installation der Stromversorgung und Steuerung für BOMBARDON und PHARAO, Montage des Maschinensatzes zur Versorgung des Neutralteilcheneinschusses (W VII), Konstruktion und Fertigung von wasser- und luftgekühlten Magnetspulen, von verschiedenen Netz-, Steuer-, Regel- und Überwachungsgeräten.

Für insgesamt 173 Aufträge – u. a. Anfertigung Testspulen für ASDEX, Montage Hauptfeldspulen W VII, Montage Ilona-Umformer – wurden im Berichtsjahre in der zentralen Elektrowerkstatt (E. Hecht) von zwölf Facharbeitern ca. 18 500 Arbeitsstunden geleistet.

3. ELEKTRONIK – ENTWICKLUNG, BAU UND WARTUNG

(G. Roos, W. Melkus)

Aus der Vielzahl der Arbeiten aus dem gesamten Gebiet der analogen und digitalen Elektronik sind zu erwähnen:

Die elektronisch geregelte Stromversorgung für den PULSATOR wurde mehrfach neuen Anforderungen des Experimentierbetriebs angepaßt; sie konnte ohne größere Schwierigkeiten in zwei selbständige Einheiten aufgeteilt werden, die Vertikalfeld- und Stellaratorwicklungen mit verschiedenen unabhängig voneinander ablaufenden Stromprogrammen versorgen. Zusätzlich wurden Einrichtungen geschaffen, die z. B. in die Stellaratorwicklung unabhängig vom laufenden Stromprogramm Stromimpulse einspeisen, deren Einsatzzeitpunkt, Dauer und Pulshöhe variabel sind.

Zum pulsweisen Betrieb und zum Schutz der Neutralteilchen-Einschußanlage am W VII wurde eine 20 KV/4A Schnellabschaltung mit der Senderöhre 4Cx 15 000A gebaut. Die Anlage, die auch für Oberflächenuntersuchungen verwendet wird, läuft bereits über 500 Betriebsstunden zur Zufriedenheit der Anwender.

Eine „elektrische Aperturblende“ als Teil einer komplexen elektronischen Apparatur aus Industrie- und Eigenbaugeräten verschiedenster Aufgabenstellungen von der Regelungstechnik bis hin zur Datenerfassung wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber für die Mikrostrahlsonde ausgebaut.

In der Elektronikwerkstatt (J. Asenkerschbaumer) wurden im Jahre 1974 von elf Facharbeitern ca. 13 000 effektive Arbeitsstunden geleistet und dabei 222 Aufträge bearbeitet. Der Fertigungsbereich umfaßte Analog- und Digitaltechnik, Regelungstechnik, Impulstechnik, Hochfrequenz- und Hochspannungstechnik.

Der Zentrale Elektronikservice (F.v. Woyna) führte Wartung und Reparatur der im Institut vorhandenen, sowie die Überprüfung der neu eingetroffenen elektronischen Geräte durch. In ca. 4800 Arbeitsstunden wurden 1187 Aufträge abgewickelt, ferner 786 Reparaturen und 396 Eingangsüberprüfungen.

4. MECHANIK – KONSTRUKTION UND FERTIGUNG

(H. Muntenbruch, P. Meyer, H. Stoll)

Die Konstruktionsbüros KBI und KBII wurden im März 1974 zusammengefaßt und in die ZTE eingegliedert. Obwohl die zentrale Konstruktion (P. Meyer) personell verstärkt wurde, mußte eine ganze Anzahl von Konstruktionsaufgaben externen Büros zur Bearbeitung überwiesen werden.

Auftraggeber waren vor allem die Projekte W VII, ASDEX, HBS, PML, Reaktorelektrotechnik, Laser-Pellets. Stichwortartige Beschreibung einiger Arbeiten:

W VII: Konstruktionsarbeiten an Gerüst, Ionenquelle, Diagnostikeinrichtungen, helischen Wicklungen, Limiter etc.

Entwurfsarbeiten für Traggerüst, Multipolspulen, Diagnostikeinrichtungen.

ASDEX: Konstruktion der Hauptfeldspulen, Entwurfsarbeiten für viele Komponenten.

HBS: Konstruktion eines 1 m-Bausteines.

In der Fertigungsvorbereitung (R. Mayer) wurden ca. 1000 Aufträge bearbeitet, davon $\frac{3}{4}$ für die zentralen mechanischen Werkstätten, etwa 200 für die Schreinerei, der Rest für extern zu fertigende Geräte und Apparaturen. Außer der Vorbereitung und Überwachung der Fertigung wurden für die Großprojekte an Hand grober Skizzen ca. 35 000 Fertigungsstunden als Planungshilfe vorkalkuliert.

In den Zentralen Mechanischen Werkstätten (H. Stoll) wurden von den Facharbeitern ca. 82 000 Produktionsstunden erbracht. Dabei war ein Wandel in der Art der Aufträge zu erkennen; denn der früher sehr geringe Anteil der Montagearbeiten erhöhte sich merklich.

Der Personalstand schrumpfte bei 6 Zu- und 8 Abgängen von 98 auf 96 Mitarbeiter am Jahresende, wobei 5 Mitarbeiter in andere Bereiche des IPP versetzt wurden und nur 3 das IPP verließen.

Der Maschinenpark wurde durch die Aufstellung einer Deckel-Universalfräsmaschine FP3, einer VDF-Hochleistungsdrehmaschine 48D und einer Lindenmaier-Fräseinheit FE80 bei Aussonderung einiger alter Maschinen verjüngt und verbessert.

Die hier im Bild gezeigten Apparaturen bzw. Geräte geben einen Eindruck von der Art der gefertigten Werkstücke.

Zu erwähnen ist noch die Lehrwerkstatt des IPP (G. Knoll), in der 20 Lehrlinge zu bestqualifizierten Facharbeitern der Fachrichtung Feinmechanik ausgebildet werden. Wie in den Vorjahren bestanden auch 1974 alle Prüflinge die Facharbeiterprüfung.

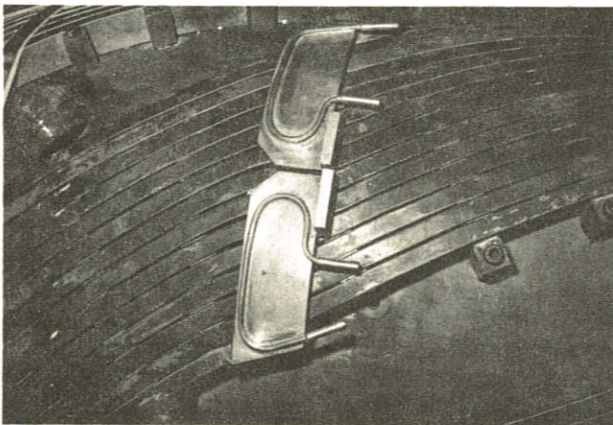
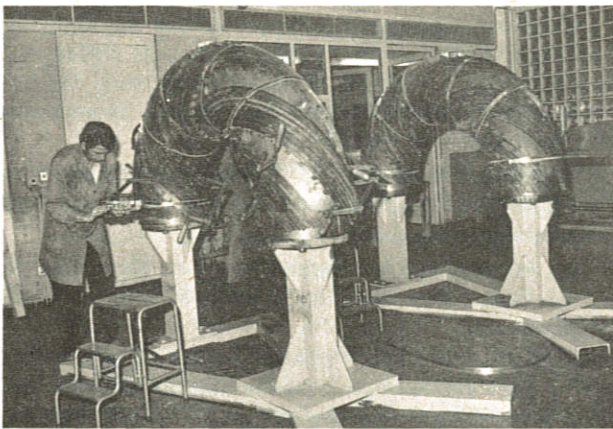


Abb. 2: Oben: Fertigung (Formung) der helischen Leiter für das Experiment WEGA in Grenoble auf dem „Dummy“-Torus. Für jeden Leiter war eine (andersgeartete) Linie mittels Steckbolzen vorzugeben. Entlang dieser numerisch berechneten Linien wurden die Leiter in der Schlosserei so geformt, daß sie anschließend ohne Formverlust nach Grenoble transportiert und auf den Originaltorus übertragen werden konnten.

Unten: Stromanschlüsse für eines der Helix-Leiterpakete, die in der oberen Abbildung sichtbar sind.

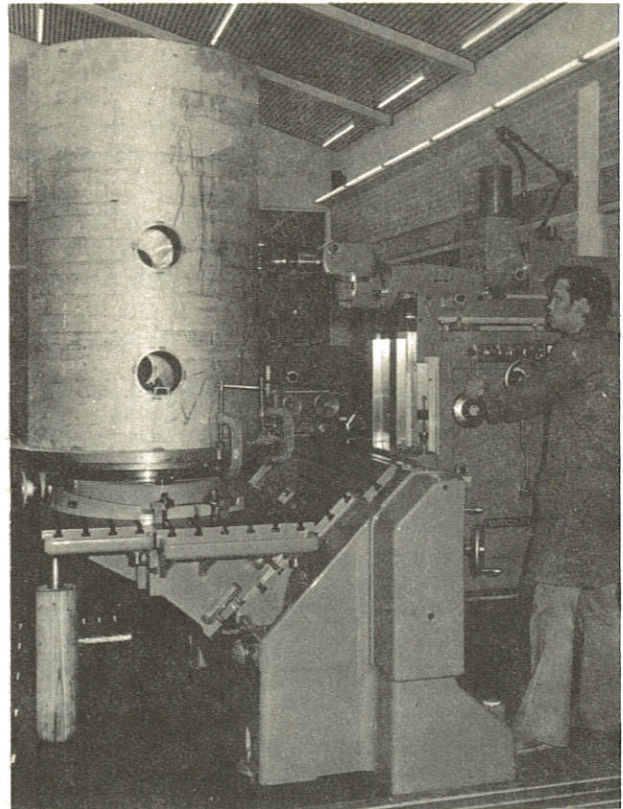


Abb. 3: Kessel für eine Thermo-Vakuumkammer für den Einsatz beim MPJ für Extraterrestrische Physik. Alternierend mit Fräsvorgängen mußten an den Bohrungen des dünnwandigen Kessels Schweißarbeiten durchgeführt werden, ohne daß dabei die Fräsmaschine (vom Typ FP 4 L) beschädigt werden durfte.

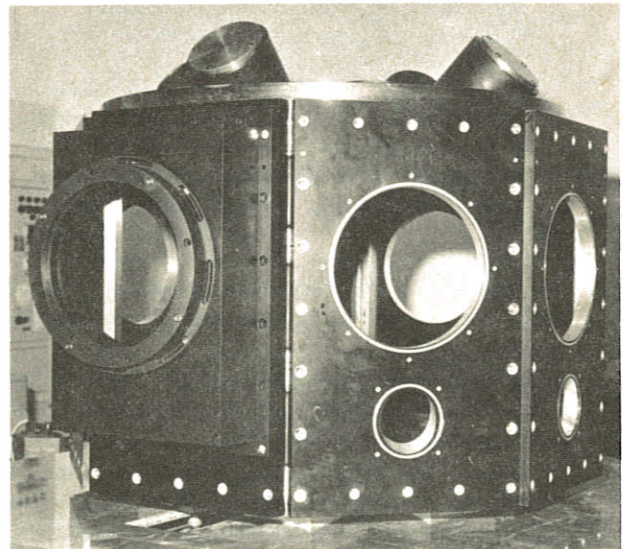


Abb. 4: Gefäß für das 1 kJ-Experiment zur Erzeugung dichter Laserplasmen. Ein Edelstahlrahmen trägt 6 Aluminiumplatten, die untereinander und gegen weitere Reserveplatten beliebig austauschbar sind. Dichtungen und die Vielzahl von Bohrungen und Fenstern erforderten bei der Herstellung äußerste Präzision, um die Austauschbarkeit zu garantieren.

5. VAKUUM- UND MATERIAL-TECHNOLOGIE

(H. Häglsperger)

Die 1974 durchgeführten Laborarbeiten dienten ausschließlich der Bearbeitung der insgesamt 407 Aufträge. Davon sind erwähnenswert

- Konstruktion und Bau einer Prüfvorrichtung für Lötverbindungen in Spulen (Zerreißmaschine für Zug- und Druckbelastung bis 25 t bei gleichzeitigem Hochstromtest mit max. 40 000 A);
- Konstruktion und Bau einer Testspule für ASDEX (erstmalig aus formgepreßter Kupferlitze);

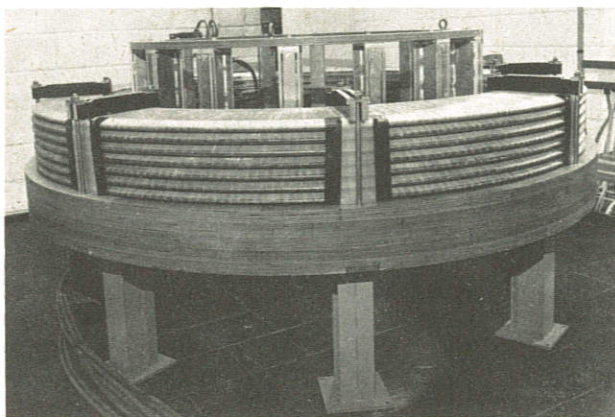


Abb. 5: Dieser Spulensatz (ϕ 2,5 m) zur Prüfung von ASDEX-Spulen ist ein typisches Beispiel für das Zusammenwirken der Fachabteilungen untereinander und mit dem Auftraggeber:

- Mechanische Konstruktion, Kühlung, Materialprobleme (Festigkeit und Verarbeitbarkeit von Kupferlitze, Isolierung) und Fertigung der Spulen wurden von der Vakuum- und Materialtechnologie (ZT) bearbeitet.
- Elektrische Auslegung und Leiterwahl erfolgten durch die Elektro- und Hochspannungstechnik (ZH).
- Konstruktion des unmagnetischen Tisches der Verspannung und der Aufnahme für die zu prüfende Spule im Zentralen Konstruktionsbüro (ZK).
- Der Tisch und die Aufnahmevorrichtung wurden in den Zentralen Mechanischen Werkstätten (ZI) gefertigt.

- Weiterentwicklung der Li-Meßapparatur (durch Vergrößerung der Niob-Diffusionsfläche und Umstellung des Dichtungsprinzips);
- Reparaturen von Spulen des Typs SP 300/12 (durch weitgehendes Auswechseln der „nichtelektrischen“ Teile wie Vergußmasse, Kühlsystem etc.);
- Bearbeitung von Materialproblemen für W VII (z. B. Entwicklung von Hochtemperaturlötungen an Mo-Mo- und Mo-V2-Verbindungen, metallografische Untersuchungen).

Aus den 69 Aufträgen der Glas-technischen Werkstatt (K. Fritsch) ragte der zur Herstellung der äußeren Gefäßwand für den Beltinch deutlich heraus. Das Gefäß mit einem Durchmesser von 1,5 m, einer Höhe von 2,5 m, einer Wanddicke von 5 cm und einem Gewicht von 2 t wurde aus vielen schmalen Verbundglasplatten in Klebetechnik gefertigt.

Die Kunststoffwerkstatt (E. A. Maier) bearbeitete 116 Aufträge, u. a. die Herstellung von Druckfunkenstreckengehäusen für den HBS im Schichtgießverfahren und das Laminieren des Torusgefäßes W VIIa in Spachtelverfahren mit neun Lagen.

6. CHEMIE UND GALVANIK

(H. Weichselgartner)

Von der Chemie wurden im Berichtsjahre 117 Aufträge bearbeitet. Diese umfaßten z. B.

- präparative Arbeiten für die Jodlasergruppe;
- analytische Untersuchungen mit Hilfe von Gaschromatografie, UV-Fotometrie und Atom-Absorptions-Spektrofotometrie zur quantitativen Bestimmung von Metallfolien, aufgedampften Schichten und anderen Niederschlägen, Bleibädern, Harzen, Lasergasgemischen etc.;
- die Anwendung elektrochemischer Verfahren zur Herstellung von Targets aus Nickel, Gold, Silber, Niob, Titan, Tantal, Zirkonium und anderen Metallen (wobei in vielen Fällen erst die Arbeitsbedingungen und die Badzusammensetzung erarbeitet werden mußten); zum Beizen und Ätzen von Oberflächen und zum Ablösen von Schichten, zum Aufbringen dünnster Schichten und solcher von erheblicher Dicke auf Gebilde komplizierter geometrischer Struktur;
- experimentelle Beiträge zur Blanket-Technologie durch quantitative Wasserstoffbestimmung in Lithium bei Temperaturen bis zu 1000 K;
- die Beseitigung von Schadstoffen und die Regenerierung von Chemikalien sowie die Wiedergewinnung von Wertstoffen.

In engem Kontakt mit der Chemie arbeitet die zentrale Galvanik (Ph. Georgens), die im Berichtsjahre 746 Aufträge bearbeitete, von denen ein großer Teil so spezieller Art war, daß er in Standardbetrieben nicht hätte ausgeführt werden können. Für diese Aufgaben stehen 40 verschiedene Bäder unterschiedlicher Größe zur Verfügung.

7. LÄGER UND GERÄTEPOOL

(H. Muntenbruch, F. Skerjanc)

Die zentralen Läger (J. Steinberger) lieferten im Berichtsjahre Materialien und Bauteile für ca. 1,8 Mio. DM.

Vom Materiallager wurden zentrale und örtliche Werkstätten sowie die Projekte mit Halbzeugen, Normteilen usw. im Werte von ca. 500 000,— DM beliefert.

Elektro-, Elektronik- und Vakuumlager versorgten Projekte und Werkstätten mit Bauteilen im Wert von ca. 1 000 000,— DM aus einem Sortiment von mehr als 4000 verschiedenen Artikeln.

Das Gaslager stellte technische, reinste und flüssige Gase sowie exotische Mischungen im Werte von mehr als 150 000,— DM zur Verfügung.

Der Gerätepool (F. Skerjanc) konnte seinen Umsatz gegenüber dem Vorjahr mehr als verdoppeln: Geräte mit einem Einkaufswert von mehr als 600 000,— DM wurden der Wiederverwendung zugeführt. Dem steht allerdings ein Zustrom von Geräten im Wert von nahezu 2 000 000,— DM gegenüber. Deshalb wurde im Berichtsjahre die Lagerfläche des Gerätepools auf nahezu 1000 m² etwa verdoppelt.

Geschäftsführung und Verwaltung

Der organisatorische Aufbau des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik

Das am 28. Juni 1960 als gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung gegründete Institut für Plasmaphysik wird gemäß den Beschlüssen des Senats der Max-Planck-Gesellschaft und der Gesellschafterversammlung des IPP ab 1. Januar 1971 als Max-Planck-Institut fortgeführt. Das Vermögen des Instituts für Plasmaphysik wurde auf die Max-Planck-Gesellschaft übertragen. Die vom Senat der Max-Planck-Gesellschaft für das Institut beschlossene Satzung trägt der bewährten Struktur und Handlungsfreiheit des Instituts in vollem Umfange Rechnung.

1. KURATORIUM

Das Kuratorium hat eine unterstützende und eine allgemeine Aufsichts- und Entscheidungsfunktion: es berät mit der Geschäftsführung und der Wissenschaftlichen Leitung das wissenschaftliche Programm und die daraus sich ergebenden Folgen für den Wirtschaftsplan. Nach Abschluß der Haushaltsverhandlungen mit den Finanzierungsträgern stellt das Kuratorium den Haushaltsplan fest und tritt insoweit an die Stelle des Senats der Max-Planck-Gesellschaft. Mitglieder des Kuratoriums:

Professor Dr. Reimar L ü s t ,
als Präsident der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V., München;

Staatssekretär Hans-Hilger H a u n s c h i l d ; seit 15. Oktober 1974: Ministerialdirektor Dr. Günter L e h r ,
als vom Bundesminister für Forschung und Technologie entsandter Vertreter;

Ministerialdirigent Hugo E i c k - K e r s s e n b r o c k ,
als vom Bundesminister der Finanzen entsandter Vertreter;

Ministerialdirektor Dr. Henning Freiherr v o n S t r a l e n - h e i m ,
Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus, als vom Freistaat Bayern entsandter Vertreter;

Dr. Klaus D o h r n ,
Schatzmeister der Max-Planck-Gesellschaft;

Professor Dr. Werner H e i s e n b e r g ,
Senator der Max-Planck-Gesellschaft;

Ministerialdirigent a. D. Dr. Alexander H o c k e r .

2. FACHBEIRAT

Zur Beratung des Instituts in allen wissenschaftlichen Fragen wurde ein Fachbeirat gebildet. Mitglieder des Fachbeirates sind:

Professor Dr. Roy W. G o u l d (Vorsitzender),
California Institute of Technology, Pasadena, USA;

Professor Dr. Bo L e h n e r t (stellvertretender Vorsitzender),
The Royal Institute of Technology, Division of Plasma Physics and Fusion Research, Stockholm, Schweden;

Professor Dr. Ludwig B i e r m a n n ,
Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, München;

Professor Dr. Xaver E d e r ,
Bayerische Akademie der Wissenschaften, Institut für Tieftemperatur, Garching;

Professor Dr. Dieter K i n d ,
Institut für Hochspannungstechnik der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig;

Professor Dr. Hans-Joachim K u n z e ,
Institut für Experimentalphysik der Ruhr-Universität Bochum, Bochum;

Professor Dr.-Ing. Günther L e h n e r ,
Institut für Theorie der Elektrotechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart;

Professor Dr. Werner S c h i l l i n g ,
Institut für Festkörperforschung der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich;

Dr. François W a e l b r o e c k ,
Institut für Plasmaphysik der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich.

3. WISSENSCHAFTLICHE LEITUNG

Der Wissenschaftlichen Leitung des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik gehören an:

Professor Dr. Rudolf Wienecke,
Vorsitzer und Wissenschaftlicher Direktor des Instituts;

Dr. Gerhart von Gierke,
stellvertretender Vorsitzter;

Professor Dr. Ewald Fünfer;

Dr. Günter Grieger;

Professor Dr. Friedrich Hertweck;

Professor Dr. Dieter Pfirsich;

Professor Dr. Arnulf Schlüter;

Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter;

Dr. Siegbert Witkowski

und

Dr. Marcel Salvat,
als Gast für die Assoziation EURATOM-IPP.

4. GESCHÄFTSFÜHRUNG

Professor Dr. rer. nat. Rudolf Wienecke,
wissenschaftlicher und technischer Geschäftsführungsbereich;

Dr. jur. Ernst-Joachim Meusel,
kaufmännischer und administrativer Geschäftsführungsbereich.

4.1 FORSCHUNGSPLANUNG UND PROJEKTÜBERWACHUNG

(Dr. Wolfgang Lotz, Dr. Ernst R. Seidel)

Dem Arbeitsbereich Forschungsplanung obliegt die Aufstellung und laufende Fortschreibung des Forschungsplans. Erstmals wurde ein Programmbudget für das Jahr 1975 erstellt.

4.2 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

(Dr. Ernst R. Seidel)

Die Arbeiten im Bereich Öffentlichkeitsarbeit waren wieder gekennzeichnet durch das Bemühen, die Forschungsarbeiten des Instituts einem möglichst breiten Kreis der Öffentlichkeit in allgemeinverständlicher Form näherzubringen, um dadurch Interesse und Verständnis für Sinn und Notwendigkeit der im IPP durchgeführten Forschungstätigkeiten zu wecken. Schwerpunktmäßig wurden dabei insbesondere die Gebiete Besucherwesen, Pressearbeit, langfristige Öffentlichkeitsarbeit und Ausstellungsfragen z.T. in enger Abstimmung mit anderen Mitgliedereinrichtungen der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF) bearbeitet.

Im Einzelnen handelte es sich um folgende Tätigkeiten:

- Organisatorische und praktische Durchführung des gesamten Besucherprogramms (Schulklassen, Studenten, Physiker, Vertreter von Wissenschaftsorganisationen, Universitäten, Vereinen, Ministerien, Botschaften und Parlamenten des In- und Auslands usw.); zum „Tag der offenen Tür“ am 26. Oktober kamen über 1200 Besucher. Die Gesamtzahl der Besucher betrug 2020.
- Herausgabe von Presseinformationen (z. T. mit Bildangebot) über aktuelle wissenschaftliche Ereignisse; Veranstaltung von Pressekonferenzen (anlässlich der Vorstellung des Fusionsreakorteknologie-Programms zu-

sammen mit KFA, GfK und HMI sowie anlässlich der Lasertagung im IPP); Ausarbeitung von Berichten über aktuelle Institutereignisse für den MPG-Spiegel; Herausgabe eines Presseservice mit Zeitungsausschnitten von Meldungen über das IPP, interessierende Forschungen, Forschungs- und Bildungspolitik usw.; Betreuung von in- und ausländischen Fachjournalisten; Betreuung von Filmteams bei Dreharbeiten im IPP; Kontakte zu den Medien, Verlagen usw.

- Mitarbeit an der Produktion eines Films über die Kernfusion und das IPP (gemeinsam mit dem Bayerischen Rundfunk); Redaktion und Gestaltung des Jahresberichts; Herausgabe einer neuen IPP-Kurzinformation (Faltblatt); Text, Redaktion und Gestaltung einer ausführlichen, bebilderten IPP-Informationsschrift; Erarbeitung und Redaktion von Selbstdarstellungen aller Art für die MPG, das BMFT usw.; Beantwortung von Bild- und Informationsanfragen; Mitredaktion und Vorbereitung zu Drucklegung und Versand der „Monatlichen Mitteilungen“; vorbereitende Arbeiten für die Herausgabe einer Hauszeitschrift.
- Vorbereitungen für einen Beitrag des IPP anlässlich einer Präsentation der AGF bei der Deutschen Industrieausstellung in Moskau 1975 und für eine IPP-Bildschau im BMFT.

4.3 SICHERHEIT

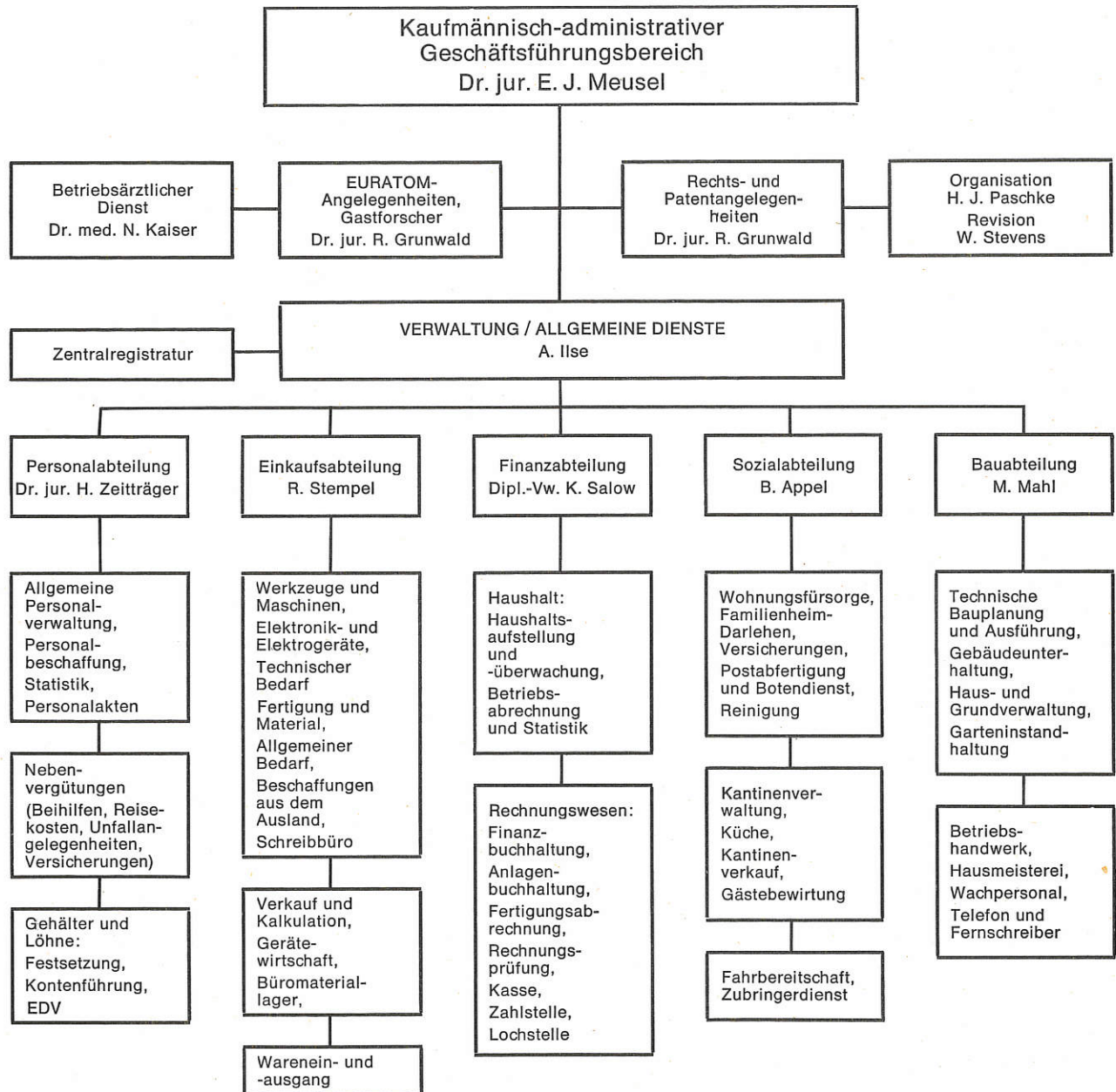
(Dr.-Ing. Manfred Hüls)

Dem Geschäftsführungsbereich „Sicherheit“ obliegt die Wahrnehmung der gesetzlich vorgeschriebenen Arbeitssicherheit, Strahlenschutz, Ordnung, Objekt- und Umweltschutz betreffenden Fürsorgepflichten und Aufgaben. Tätigkeitsschwerpunkte liegen damit in der Sicherheitsorganisation, der Koordination und Überwachung der allgemeinen und anlagespezifischen Gefahrenabwehr sowie der Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen und zur Eingrenzung ihrer Folgen.

In den verschiedenen Bereichen des Institutes sind 16 Sicherheitsbeauftragte, 7 Laserschutzbeauftragte und 17 Strahlenschutzverantwortliche (davon 7 A-SSV) eingesetzt. Von diesen konnten im Berichtsjahre 11 Sicherheitsbeauftragte berufsgenossenschaftliche Ausbildungskurse besuchen. Infolge mangelnden Angebots geeigneter Strahlenschutzlehrgänge erbrachten nur 5 Strahlenschutzverantwortliche den von der Röntgenverordnung geforderten Fachkundennachweis.

Die freiwillige Betriebsfeuerwehr des IPP hat 14 Mitglieder; sie nahmen 1974 an 24 halbtägigen Übungen teil, absolvierten ein Einsatztraining unter Verwendung schwerer Atemschutzgeräte in Hohenpeßenberg und besuchten Brandschutzseminare, Ausstellungen und Kurse der Staatlichen Feuerweherschule Regensburg.

Im Jahre 1974 wurden bei zahlreichen Institutsbegehungen und Beratungen auch mit Vertretern der Sicherheitsbehörden Arbeitsplätze in den verschiedenen Bereichen besichtigt. Grobe Verstöße gegen die einschlägigen Unfallverhütungsvorschriften und Gesetze konnten dabei nicht festgestellt werden. In einigen Fällen wurden aber Änderungsaufgaben erteilt. Für drei Arbeitsstätten mußten arbeitsmedizinische und arbeitshygienische Gutachten eingeholt werden.



Die Gesamtzahl der Unfälle erhöhte sich bei 1069 Mitarbeitern am Jahresende 1974 von 222 im Jahre 1973 um 19% auf 264. Darin ist die mit 33 gegenüber dem Vorjahre mit 18 um 83% erhöhte Zahl derjenigen Unfälle enthalten, die aufgrund einer mehr als dreitägigen Arbeitsunfähigkeit dem Sozialversicherungsträger angezeigt werden mußte. Dies führte für das Jahr 1974 zu einer prozentualen Unfallquote von 3,09% (Vorjahr: 1,69%). Diese Erhöhung der Quote meldepflichtiger Unfälle ist auf die starke Zunahme von Bagatellunfällen zurückzuführen, auf deren Verhütung nur schwer Einfluß zu nehmen ist.

Das IPP gehörte auch 1974 im Vergleich zur Zahl meldepflichtiger, den gewerblichen Berufsgenossenschaften angezeigten Arbeits- und Wegeunfälle, die im Vorjahr 103/1000 Versicherter betrug, mit 31/1000 zu den Betrieben mit den geringsten Unfallzahlen.

Der durch die meldepflichtigen Unfälle verursachte Arbeitszeitausfall betrug im Berichtsjahre mit insge-

samt 473 Fehltagen mehr als das Doppelte des Jahres 1973 (225 Arbeitsausfalltage). Damit ergibt sich ein mittlerer spezifischer Arbeitsverlust von 13,7 Arbeitsausfalltagen je Unfall (= 8% weniger als 1973) bzw. 0,013 Arbeitsausfalltagen je Unfall und Mitarbeiter (1973: 0,014).

Im Berichtszeitraum wurden wiederum Mitarbeiter der verschiedenen Bereiche mit Stabdosimetern und Filmplaketten auf die erhaltene Strahlendosis überwacht. Bei 1184 in der GSF-Neuherberg durchgeführten Plakettenauswertungen ergaben sich glücklicherweise keine personenschädigenden Dosisüberschreitungen. Die höchste ermittelte Personen-Monatsdosis lag bei 480 mrem; dies sind 52% des auf einen Monat umgerechneten höchstzulässigen Vierteljahreswertes.

Die geplante Einrichtung einer hauptberuflichen Werkfeuerwehr für alle Garchingener Forschungsinstitutionen mußte vorerst zurückgestellt werden, da das IPP eine Abordnung von Mitarbeitern ablehnt und die von der Techni-

schen Universität München dafür beantragten Planstellen noch nicht zugewiesen wurden.

Zu den Schwerpunkten im Tätigkeitsbereich „Sicherheit“ gehörte 1974 neben den sich aus dem Inkrafttreten neuer Vorschriften und Gesetze (z. B. Röntgenverordnung, UVV „Kranne“, „Lärm“, Sicherheitsingeniurgesetz) ergebenden organisatorischen und sachlichen Anforderungen weiter die Bearbeitung der Komplexe „Tritium“, „Aktivmaterialien“ und „Sicherheitsaspekte“ im Rahmen der Bewerbung des IPP um den Standort für das große europäische Fusionsexperiment JET. Dabei zeigte sich, daß in diesem Zusammenhang auftretende Sicherheitsprobleme in Garching beherrschbar sind.

4.4 RECHTS- UND PATENT-ANGELEGENHEITEN

(Dr. jur. Reinhard Grunwald, Dr.-Ing. Manfred Hüls)

Schwerpunkte der Arbeit lagen bei der Organbetreuung, den institutsinternen Rechtsangelegenheiten, der Mitwirkung an allen nicht formularmäßig abgeschlossenen Verträgen und an der Zusammenarbeit des Instituts mit EURATOM, mit der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF) und anderen Instituten.

Mit anhaltender Tendenz zur Vergrößerung der Experimente steigen Gewicht und Werte der Aufträge, die für Vorbereitung und Durchführung der Arbeiten des Instituts erforderlich sind. Wesentliches Problem der Großverträge ist es, eine möglichst klare Terminplanung sowie die jeweilige Rückkopplung von Informationen aus der Fertigung bzw. neuen Erkenntnissen der wissenschaftlichen Arbeit sicherzustellen.

Die rechtliche und organisatorische Vorbereitung der Bau- und Betriebsphase für das Experiment JET wurde diskutiert. Im JET-Administrative-Committee spielten Fragen der Beschaffungsordnung und der Gestaltung von größeren Bestellungen eine wichtige Rolle.

Für die Zusammenarbeit auf den Gebieten der fusionsgerichteten Plasmaphysik und der Fusionsreakorttechnologie wurden Vertragsentwürfe erarbeitet.

Die Patentstelle verwaltet die Patente des IPP und sorgt für ihre Verwertung. Die Anfang 1974 eingeführte formularmäßige Abwicklung des dabei anfallenden umfangreichen Schriftverkehrs mit Stellen außerhalb des Instituts einerseits, den Erfindern und Stellen innerhalb des Instituts andererseits, hat sich sehr gut bewährt. Nur dadurch war es möglich, den – etwa wegen erweiterter Informationspflichten – gestiegenen Arbeitsaufwand mit dem bisherigen Personalbestand zu bewältigen.

Laufende deutsche Anmeldungen	50
(Stand 31. 12. 1974)	
davon erteilte Patente	6
eingetragene Gebrauchsmuster	7
eingetragene Geschmacksmuster	1
erteilte ausländische Patente	38
Neuanmeldungen in 1974	
deutsche Patentanmeldungen	3
Auslandsanmeldungen	7
erteilte deutsche Patente in 1974	2
erteilte ausländische Patente in 1974	11
Freigaben deutscher Anmeldungen	12
Freigaben ausländischer Anmeldungen	28

Bei den Erfindungen von Mitarbeitern im Institut handelt es

sich regelmäßig um Arbeitnehmererfindungen. Daher bildet die Koordinierung der Überlegungen im Institut, ob eine Erfindung in Anspruch genommen werden soll oder nicht, gegebenenfalls dann die Berechnung der Erfindervergütung, den Schwerpunkt der Arbeit der Patentstelle. Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Entscheidung über die Inanspruchnahme einer Erfindung ist – neben der Sicherstellung der eigenen Arbeitsmöglichkeit – die Frage der wirtschaftlichen Verwertbarkeit, die durch den Patentschutz gewährleistet wird.

Neben den im Institut vorhandenen Erfahrungen und dem Patentanwalt, der das Institut berät, steht mit der Verwertungsgesellschaft „Garching Instrumente GmbH (GI)“ ein Partner bereit, der über ausgezeichnete Kontakte zu potentiellen Interessenten verfügt und bei der Prognose der Verwertbarkeit beratend mitwirkt. Mit GI hat das Institut eine Reihe von Lizenzverträgen ausgehandelt, zuletzt über den Jodlaser.

4.5 EURATOM-ANGELEGENHEITEN

(Dr. jur. Reinhard Grunwald)

Das wissenschaftliche Programm des Instituts wurde im Berichtszeitraum wiederum unter Beteiligung von Wissenschaftlern und Technikern der Europäischen Atomgemeinschaft durchgeführt. Gemäß dem Assoziationsvertrag für die Jahre 1971–1975 beteiligt sich EURATOM an den gemeinsamen Aufwendungen für die Durchführung des allgemeinen Forschungsprogrammes mit etwa 20 %, an einigen vorrangigen Investitionen mit etwa 44 %.

Die Verbindung zu den übrigen Assoziationspartnern von EURATOM wurde – insbesondere über die „Groupe de Liaison“ und das „Comité des Directeurs“ – weitergeführt.

Das Institut arbeitet an dem gemeinsamen europäischen Fusionsexperiment vom Typ TOKAMAK (JET) mit.

4.6 ORGANISATION UND REVISION

(Hans-Joachim Paschke und Werner Stevens)

Die „Organisation“ befaßt sich mit der EDV- und Allgemeinen Organisation. So wurden u. a. Organisationsvorschläge für Haushaltsüberwachung und Bestellwesen, Lagerverwaltung und Zeichnungsregelung vorgelegt und verschiedene Vordrucke und Organigramme entworfen und eingeführt.

Im Rahmen der Mitarbeiterschulung wurde ein Kurs zur Einführung in die Datenverarbeitung für 40 Mitarbeiter der Verwaltung durchgeführt.

Die „Revision“ war beratend tätig und führte Ordnungsmäßigkeitsprüfungen durch.

4.7 BETRIEBSÄRZTLICHER DIENST

(Dr. med. Nils Kaiser)

Der Betriebsärztliche Dienst im Institut hatte im Jahre 1974 trotz der in den letzten Jahren erheblich gestiegenen Anforderungen den gleichen Personalstand: einen Arzt, zwei Krankenschwestern und eine MTA.

Für die rasche Durchführung der Ersten Hilfe stehen ein Sanitätskraftwagen, ein Beatmungsgerät mit Notintubationsbesteck und ein Herzschrittmacher zur Verfügung.

Im medizinisch-diagnostischen Labor wurden Untersuchungen für Einstellungen und laufende Überwachungen der Mitarbeiter durchgeführt.

Für die physikalische Diagnostik existieren ein Hör- und ein Sehtestgerät, sowie für die Dokumentation des Augen-

hintergrundes der mit Laser arbeitenden Institutsangehörigen eine Funduskamera.

Als physikalisch-therapeutische Geräte sind ein Kurzwellen-, ein Gleichstromtherapiegerät, ein Inhalationsgerät und eine Rot-Blaulichtlampe vorhanden.

Der Betriebsärztliche Dienst wurde im Jahre 1974 aus 7031 Anlässen von Mitarbeitern des Instituts aufgesucht.

5. VERWALTUNG UND ALLGEMEINE DIENSTE

(Leitung: Adolf Ilse)

Der Bereich „Verwaltung“ umfaßt die Personal-, die Einkaufs- und die Finanzabteilung. Zu den „Allgemeinen Diensten“ gehören die Sozial- und die Bauabteilung.

5.1 PERSONALABTEILUNG

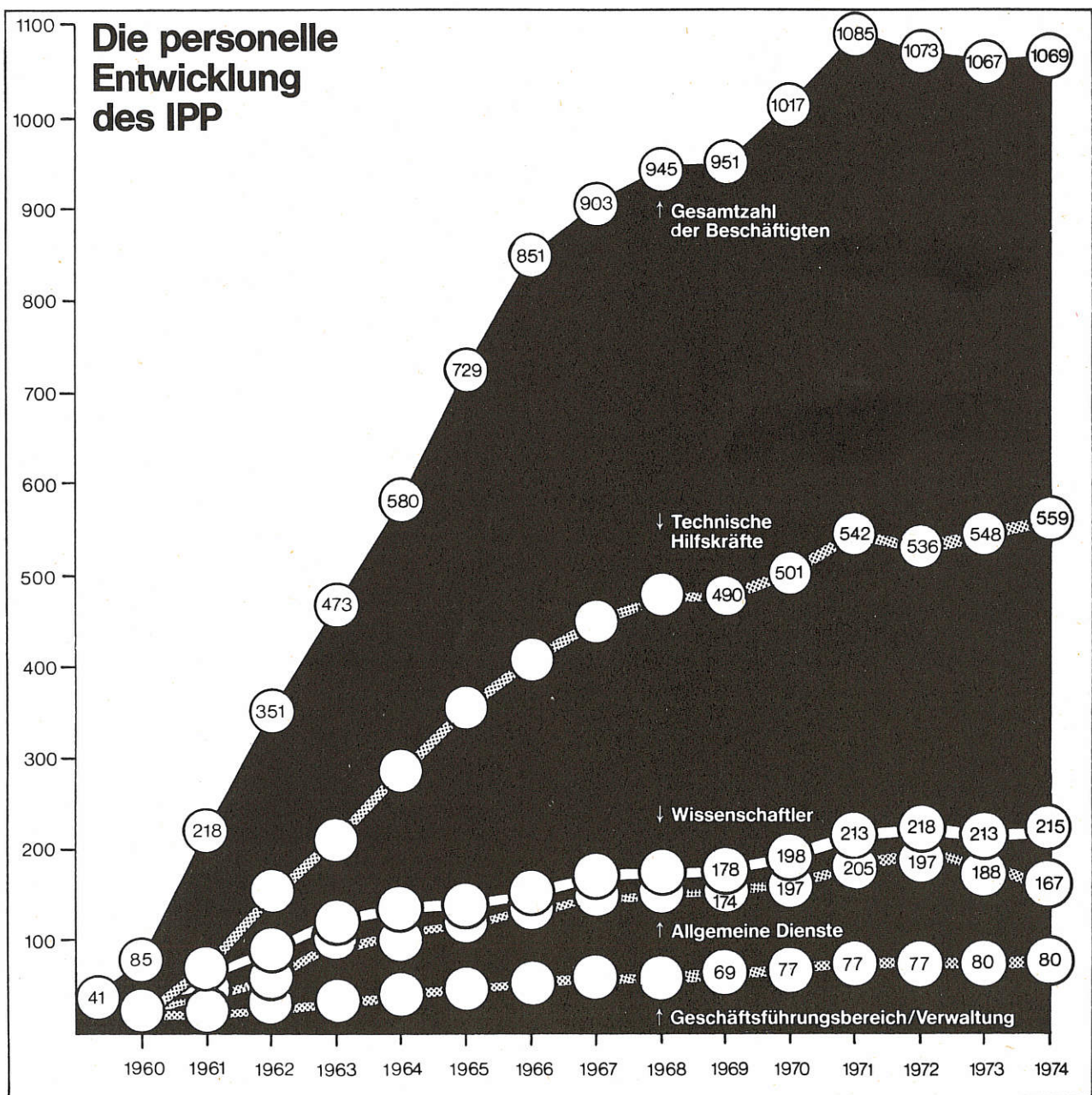
(Dr. Helmut Zeiträger)

Neben den in einer Personalabteilung üblichen Arbeiten,

wie der Erledigung der mit der Lohn- und Gehaltsfestsetzung zusammenhängenden Aufgaben der Bearbeitung der Nebenleistungen (Beihilfen, Umzugskosten, Dienstreisen usw.) und der Überwachung des Stellenplans ergab sich ein wesentlicher Teil der Tätigkeit der Personalabteilung im Kalenderjahre 1974 aus zahlreichen Tarif- und Gesetzesänderungen. So wurden zum 1. Januar 1974 die Bezüge der Angestellten und Arbeiter um 11%, mindestens jedoch um DM 170,- monatlich angehoben, wodurch sich für diese eine effektive tarifliche Erhöhung von ca. 11–17,4% ergab.

Die nach dem Manteltarifvertrag für die gewerblichen Arbeitnehmer in der bayerischen Metallindustrie (M-Tarif) vergüteten Arbeiter erhielten ab 1. Februar 1974 eine tarifliche Erhöhung von 11%.

Mit Wirkung vom 1. Oktober 1974 wurden sämtliche Lohnempfänger, die bisher entsprechend dem M-Tarif eingestuft waren, in den Manteltarifvertrag für Arbeiter des Bundes



(MTB II) überführt. Diese Regelung brachte den Vorteil, daß für die Lohnempfänger im Institut nur noch ein Tarifvertrag Gültigkeit hat. Denjenigen Mitarbeitern, deren Vergütung nach dem M-Tarif am 1. 10. 1974 noch höher war als eine entsprechende Vergütung nach dem MTB einschließlich aller möglichen Zulagen nach der SR 2 m, konnte eine durch Höhergruppierung oder Dienstzeitsteigerung aufzehrbare Besitzstandszulage in Höhe des Differenzbetrages gezahlt werden. Die Geschäftsführung hat mit Zustimmung des Betriebsrates mit jedem Mitarbeiter die Änderung seines Einzelvertrages vereinbart.

Vom 1. Januar 1974 bis 31. Dezember 1974 hat sich die Anzahl der Beschäftigten von 1067 nur um 2 auf 1069 erhöht, so daß die Gesamtzahl nahezu konstant geblieben ist. Der Personalzugang ist nur bei den außerhalb des Stellenplans Beschäftigten zu verzeichnen. Die Zahl der außerhalb des Stellenplans Beschäftigten ist gegenüber 1973 um 16 Personen angestiegen. Gleichzeitig hat sich die Zahl der Mitarbeiter auf Planstellen um 14 verringert. Eine Auflage der Geldgeber, bis 31. Dezember 1974 insgesamt 30 Planstellen freizumachen, konnte aus der Fluktuation gedeckt werden. Die Austrittsfluktuation der Mitarbeiter auf Planstellen vom 1. Januar bis 31. Dezember 1974 ist in nachstehender Übersicht dargestellt:

Gruppe 1 = wiss. Angestellte	
AH 4 – BAT Ia	3,9%
Gruppe 2 = wiss. Angestellte	
BAT Ib – BAT IIa	8,0%
Gruppe 3 = techn. Angestellte	
BAT IIa T – BAT Va	1,5%
Gruppe 4 = techn. Angestellte	
BAT Vb – BAT Vlb	3,5%
Gruppe 5 = techn. Angestellte	
BAT VII – BAT X	11,1%
Gruppe 6 = Verw. Angestellte	
S – BAT Vb	5,2%
Gruppe 7 = Verw. Angestellte	
BAT Vc – BAT X	12,3%
Gruppe 8 = Facharbeiter	
M 0 – M III, MTB I – IV	5,1%
Gruppe 9 = ungel. Arbeiter	
M IV – VI, MTB V – VIII	9,5%
Durchschnittliche Gesamtfuktuation	5,5%

Die auf der vorangegangenen Seite dieses Jahresberichts wiedergegebene Graphik gibt einen Überblick über die personelle Entwicklung seit Gründung des Instituts bis 1974 (Stellen-Ist). In der Gesamtzahl sind Lehrlinge, Zeithilfen, freie Mitarbeiter, Nachtwachen, Diplomanden und Gastforscher enthalten.

5.2 EINKAUFABTEILUNG

(Richard Stempel)

Das Hauptgewicht der im Berichtsjahre von der Einkaufsabteilung abgewickelten Aufträge lag bei den Beschaffungen für die großen Projekte W VII, WEGA, PULSATOR sowie für die Laser-Forschung und die Projektierung für das Experiment ASDEX. Für das letztere Experiment wurde z. B. ein F.-u.-E-Vertrag mit dem Konsortium *INTERATOM-SIEMENS* über Planungs- und Konstruktionsarbeiten mit einem Wert von rd. DM 0,9 Mio. abgeschlossen und außerdem an die Firma *BBC* ein Auftrag über die Lieferung von Magnetfeldspulen im Wert von DM 9,4 Mio. vergeben. Für

die bereits im Bau befindlichen Großexperimente wurden ferner Aufträge über die Bearbeitung der Gerüstkonstruktion, der Entladungsgefäße, der Tragringe, der OH-Trafo-spulen usw. z. T. an Firmen im Gebiet der EG erteilt.

Von den in Auftrag gegebenen größeren Geräten seien besonders erwähnt: ein Neodym-Laser hoher Leistung (100 J, 30 nano-sec.) der französischen Firma *CILAS* im Werte von DM 0,86 Mio., ein UV-Spektrograph für diagnostische Zwecke mit DM 0,2 Mio., ein Kryostatsystem und mehrere Hochvacuumstände.

Auch in diesem Berichtsjahre wurden durch Direktbezüge aus dem Ausland, speziell den USA, erhebliche Einsparungen erzielt. Aus der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF) ist ein Forschungszentrum dem Beispiel des IPP gefolgt und erzielte dabei gute Erfolge.

Nachdem dem IPP in den vergangenen Jahren nur sehr kurz gefaßte Einkaufs-Richtlinien vorlagen, wurde 1974 in Zusammenarbeit mit den verschiedensten Stellen des Instituts eine umfassende Einkaufsordnung verfaßt, die sowohl den notwendigen Vorschriften des Bundes und der Max-Planck-Gesellschaft als auch den Interessen der wissenschaftlichen Arbeit Rechnung trägt.

5.3 FINANZABTEILUNG

(Dipl.-Volkswirt Karl Salow)

Das Haushaltsvolumen des Instituts für das Jahr 1974 war im Wirtschaftsplan auf DM 74,2 Mio. festgelegt worden. Hierzu sind die nachträglich genehmigten Personalmehrmittel für tarifliche Steigerung von DM 5,8 Mio. zu rechnen, so daß sich das endgültige Haushaltsvolumen für 1974 auf DM 80,0 Mio. belief.

Die Finanzierung war wie folgt vorgesehen:

Betriebserträge	DM 11,6 Mio.
EURATOM-Zuschuß	DM 16,2 Mio.
Zuschuß des Bundes	DM 47,0 Mio.
Zuschuß des Freistaates Bayern	DM 5,2 Mio.
insgesamt	DM 80,0 Mio.

Die Ist-Ausgaben erreichten die veranschlagte Summe von DM 80,0 Mio. In der Finanzierung übertrafen die Betriebserträge den veranschlagten Betrag um DM 0,2 Mio., so daß in dieser Höhe ein Kassenbestand am Jahresende vorhanden war.

Die Ausgaben setzten sich im Berichtsjahre, verglichen mit den Vorjahren, wie folgt zusammen:

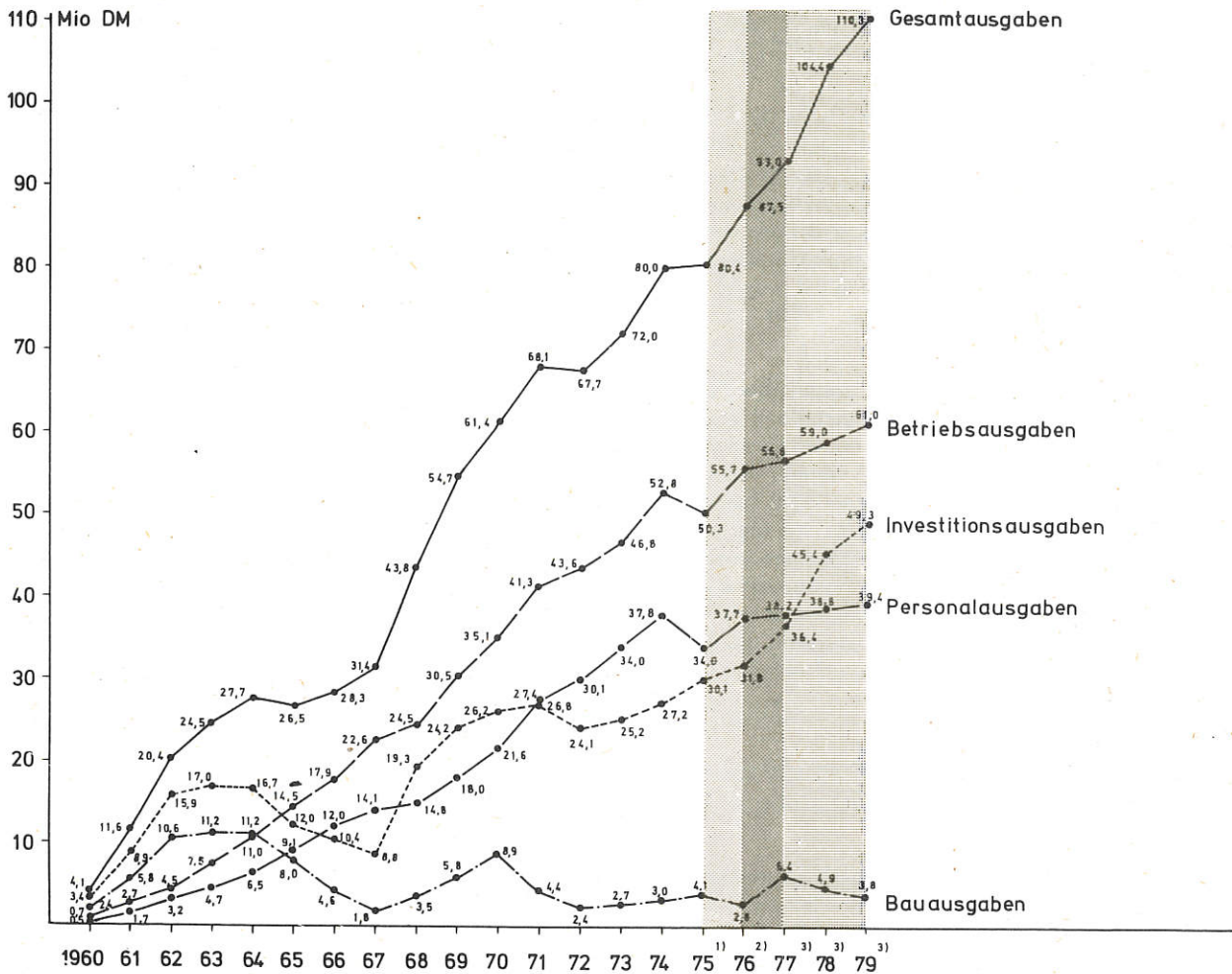
	1972	1973	1974
	DM Mio.	DM Mio.	DM Mio.
Personalausgaben	30,1	34,0	37,8
Sachausgaben	13,5	12,8	15,0
Betriebsausgaben	43,6	46,8	52,8
Lfd. Investitionen	13,2	10,5	10,3
Investitionen n. Plan	10,9	14,7	16,9
Summe Investitionen	24,1	25,2	27,2
Gesamtausgaben	67,7	72,0	80,0

Die Finanzierung wurde wie folgt vorgenommen:

Eigene Erträge	13,3	12,1	11,8
EURATOM-Zuschuß	13,9	15,5	16,2
Zuschuß des Bundes	36,5	39,9	46,8
Zuschuß des Freistaates Bayern	4,0	4,5	5,2
insgesamt	67,7	72,0	80,0

(Siehe auch die Graphik auf der nächsten Seite!)

ENTWICKLUNG DER AUSGABEN



Stand 15.3.75

1) nach Wirtschaftsplan
 2) nach Wirtschaftsplan - Entwurf
 3) nach mittelfristiger Finanzplanung

5.4 SOZIALABTEILUNG (Berthold Appel)

Wohnungsfürsorge

Mit Hilfe der dem IPP zur Verfügung stehenden Wohnungsbaumittel wird in Garching, Mühlgasse, ein Terrassenhaus mit 36 Wohnungen und 36 Pkw-Abstellplätzen in einer Tiefgarage errichtet. Das Bauvorhaben wurde im Dezember 1974 begonnen; es soll im Juli 1976 bezugsfertig sein. Das Institut gewährte ein Darlehen von DM 3 242 000,—. Die in der Wirtschaftlichkeitsberechnung ermittelte Kostenmiete von DM 4,44 liegt im Rahmen der Richtlinien für Bundesbediensteten-Wohnungen und ist von der Oberfinanzdirektion München gebilligt worden.

Am Ende des Berichtsjahres verfügte das Institut über folgenden Wohnungsbestand:

1. Institutseigene Wohnungen:

a) auf dem Institutsgelände		
Dienstwohnungen	8	
Gästewohnungen	6	
b) Garching, Lehrer-Stieglitz-Str.		
Werkwohnungen	36	50

2. Wohnungen, bei denen das IPP ein Wohnungsbelegungsrecht hat:

München, Ungererstraße	16
München, Lasallestraße	26
Garching, Otto-Hahn-/Max-Planck-Str.	108
Garching, Türkenstraße	12
Garching-Ost, Breslauer Straße	40
Garching, Mühlgasse	22 224

3. Angemietete Gästewohnungen:

Garching, Ismaninger Straße 14	1
München, Elisabethstraße 71	1
München, Heßstraße 44	1
München, Lützelsteiner Straße 18	1
München, Rümmanstraße 59	1 5 279

Die mit Wohnungsfürsorgemitteln des Instituts gebauten Wohnungen ergeben, auf Garching und München verteilt, folgendes Bild:

	1-Zi.	2-Zi.	3-Zi.	4-Zi.	5-Zi.	Add.	in %
München	11	10	15	5	1	42	16
Garching	19	41	105	37	16	218	84
	30	51	120	42	17	260	100

1974 hat das Institut Familienheimdarlehen in Höhe von DM 500 000,— vergeben. Damit wurden elf Eigenheime neu gefördert. Das Institut hat bisher 98 Mitarbeitern ein Familienheimdarlehen gewähren können.

Kantine

Am 17. 3. 1974 wurde wegen der im Jahre 1974 wirksam gewordenen Lohnerhöhung der Essenspreis um DM 0,50 je Essen auf DM 3,— für Essen I und DM 3,50 für Essen II erhöht. Für die Mitarbeiter auf dem Forschungsgelände wurden im Berichtsjahre 222 553 Essenportionen ausgegeben.

Das Institut hat auch 1974 das Gymnasium Garching mit warmen Mittagsmahlzeiten versorgt; dazu wurden 25 545 Essenportionen angeliefert.

Fahrbereitschaft

1974 hat der Vorlesungsbetrieb der Technischen Universität München am Physik-Department ganzjährig stattgefunden. Dafür hat das Institut seinen Omnibusdienst verstärkt. Die institutseigenen Busse werden von der Regierung von Oberbayern seit November 1972 befristet mit einem dreimonatigen Vorlauf genehmigt. Es liegt eine Bestätigung des Bayerischen Kultusministeriums vom 16. 12. 1974 vor, nach der die Regierung von Oberbayern auf Bitten des Ministeriums den Buspendienst weiter genehmigen wird. Nach Ansicht des Ministeriums ist damit die Beförderung der Studenten nach Garching im bisherigen Umfang gewährleistet.

5.5 BAUABTEILUNG

(*Bauingenieur Martin Mahl*)

5.5.1 Neubauten

5.5.1.1 Anbau Halle L 7

Die Baumaßnahme wurde termingerecht abgewickelt. Vorbereitungsräume für das Experiment W 7 konnten ab Herbst 1974 benutzt werden; die übrigen Arbeitsräume dafür werden im April 1975 bezogen. Von den genehmigten Kosten in Höhe von DM 3 200 000,— konnten DM 500 000,— eingespart werden.

In Verbindung mit dem Neubau L 7 A wurden ca. 200 m unterirdische Betonkanäle für eine Hochstromverbindung mit Alu-Schienen zwischen den Gebäuden L 5 – I 1 – L 7 A gebaut. Der Bau des Kühlwassersystems für das Experiment

W 7 (rund DM 1 000 000,—) wurde von der Bauabteilung mit betreut.

5.5.1.2 Erweiterung der Zentralwerkstatt

Nach Abschluß der Erhebungen des Bundesrechnungshofes konnte im Mai 1974 an der Planung weitergearbeitet werden. Baubeginn war im September. Am Jahresende war der Rohbau fertig und das Gebäude soweit abgedichtet, daß mit dem Innenausbau begonnen werden konnte. Mit der Fertigstellung ist Anfang 1976 zu rechnen.

5.5.1.3 Außenanlagen

Nach Abschluß der Arbeiten für Kühlwasserversorgung, Schienenkanäle und Kabelverlegungen wurden die Außenanlagen wiederhergestellt, die Straßendecken geschlossen und die Bepflanzung ergänzt.

5.5.1.4 Fernsprechanlagen

Die Fernsprechanlage wurde um 50 Nebenstellen auf 1050 Nebenstellen erweitert.

5.5.2 Gebäude in Planung

5.5.2.1 Halle L 1 A

Die Planung M 1:100 wurde abgeschlossen.

5.5.3 Umbauten

Außer den Umbauten an Gebäuden, die durch Umgruppierungen in den Abteilungen oder durch den Aufbau neuer Experimente bedingt waren, wurden folgende Baumaßnahmen durchgeführt und abgeschlossen:

Halle L 7 Splitterschutzwand aus Betonfertigteilen (ca. 250 qm).

Umbau der Aluminiumbühne

Bau eines Kabelbodens über den Kühlwasserrohren.

5.5.4 Hausverwaltung

Ein großer Teil der Instandsetzungs- und Umbauarbeiten wurde mit den Fach- und Hilfskräften der Hausverwaltung ausgeführt. Der Stamm von Fachkräften in der Hausverwaltung ermöglicht es dem Institut, derartige Arbeiten mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand auszuführen. Fremdfirmen sind schwer bzw. nur unter unverhältnismäßig hohen Kosten für Transport und Wegegeld zu bewegen, kleine Aufträge in Garching auszuführen.

VERÖFFENTLICHUNGEN und Konferenzberichte

- 1 *Allgeyer, R.*
Broser, E.
Düchs, D.
Feneberg, W.
Haas, G.
Herppich, G.
Keilhacker, M.
Kornherr, M.
Lackner, K.
Niedermeyer, H.
Poschenrieder, W.
Preis, H.
Rapp, H.
Rebhan, E.
Steuer, K.
Wesner, F.
ASDEX, a Tokamak with Axisymmetric Divertor
8th Symp. Fusion Technology EUR 5182e, 317 (1974)
- 2 *Amenda, W.*
Pillsticker, M.
Söll, M.
Investigations on Cryotron Breakers in Garching
Proc. of the 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182e, 407 (1974)
- 3 *Andelfinger, C.*
Dommaschk, W.
Hoimann, I.
Merkel, P.
Schuhmacher, U.
Ulrich, M.
Acceleration of Electron Rings and Investigations on Ion-Electron Instabilities in the Garching ERA Experiment
Proc. IXth Int. Conf. on High Energy Accelerators, Stanford, Cal. May 2-7, 218 (1974)
- 4 *Appleton, B. R.*)*
Behrisch, R.
Noggle, T. S.)*
Schow, O. E.)*
Investigation of Hyperchanneling for H*) and He*) in Ag-Crystals
Verh. DPG (VI) 9, 715 (1974)
- 5 *Arendt, F.*
Herppich, G.
Knobloch, A.
Komarek, P.)*
Energetic and Economic Constraints on the Poloidal Windings in Conceptual TOKAMAK Fusion Reactors
Proc. of the 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182e, 563 (1974)
- 6 *Bäumler, J.*
Junker, J.
Melkus, W.
Probst, F.
Schilling, G.
Speth, E.
High Power DC Neutral Particle Injection for W VII
8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182e, 433 (1974)
- 7 *Bachmann, R.*
Kompa, K. L.
Nöth, H.)*
Rinck, T.)*
Infrared Laser Specific Reactions of Boranes
I. Conversion of Diborane to Icosaborane (16), B₂₀H₁₆
Chem. Phys. Lett., 29, 627 (1974)

*) Kein Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, Garching

- 8 *Barett, J. H.**
*Appleton, B. R.**
*Noggle, T. S.**
*Moak, C. D.**
*Biggerstaff, S.**
*Datz, S.**
Behrisch, R. Hyperchanneling
Atomic Collisions in Solids 2, 645 (1974)
- 9 *Bateman, G.*
Schneider, W.
Grossmann, W. MHD Instabilities as an Initial Boundary-Value Problem
Nucl. Fusion 14, 669 (1974)
- 10 *Baumhacker, H.*
Lang, R.S. An Actively Modelocked TEA-CO₂ Laser with High Power Multiband Output
Phys. Lett. 47A, 329 (1974)
- 11 *Bay, H.L.**
*Andersen, H. H.**
Hofer, W. O. Measurements on the Transmission Sputtering Yield of Polycrystalline Gold Foils for Heavy-Ion-Bombardment
Proc. 7th Yugoslav. Symp. on Physics of Ionized Gases, 99 (1974)
- 12 *Bay, H.L.**
*Andersen, H. H.**
Hofer, W. O. Transmission Sputtering Yields of Polycrystalline Gold Foils for Heavy-Ion-Bombardment
Gen. Meeting Danish Soc. for the Physics and Chemistry of Condensed Matter, Helsingør, May (1974), Paper No. F3
- 13 *Becker, G.* Mode Coupling in Dynamic Stabilization of MHD Modes Plasma Physics 16, 261 (1974)
- 14 *Becker, G.* Axial Contraction in Toroidal Pinches with Non-Circular Plasma Cross-Section
Z. Phys. 269, 35 (1974)
- 15 *Becker, G.* Analytische Untersuchung von MHD-Gleichgewichten des Belt-Pinches
Verh. DPG (VI), 9, 473 (1974)
- 16 *Becker, G.*
Wunderlich, R. Neutron Flux Distribution on the Wall of Toroidal Controlled Thermonuclear Reactor Devices with Elongated Cross Section
Z. Phys. 269, 41 (1974)
- 17 *Becker, G.*
Düchs, D. F. Transport Processes in Belt-Pinches
Bull. Am. Phys. Soc. 19, 950 (1974)
- 18 *Becker, G.*
Eberhagen, A.
Gruber, O.
Herold, H.
*Pery, J. M.**
Röhr, H.
Wilhelm, R.
Zwicker, H. The Garching Belt Pinch Experiments
5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), Paper CN-33/E4-1
- 19 *Behrisch, R.*
Scherzer, B. M. U. Rutherford Back-Scattering as a Tool to Determine Electronic Stopping Powers in Solids
Thin Solid Films 19, 246 (1973)
- 20 *Behrisch, R.*
Eckstein, W.
Meischner, P.
Scherzer, B. M. U.
Verbeek, H. Charged Fraction of 5 keV to 150 keV Hydrogen Atoms after Emergence from Differential Metal Surfaces
Atomic Collision in Solids 1, 315 (1974)
- 21 *Behrisch, R.* Sputtering by Energetic Light Ions (inv.)
Gordon Conf. on Particle Solid Interaction, Holderness School, N.H. USA, 29. 7.-2. 8. 1974
- 22 *Behrisch, R.*
*Appleton, B. R.**
*Murphee, J.**
*Noggle, T. S.** Hyperchanneling of H. and He Ions in Ag Single Chrystals
Bull. Am. Phys. Soc. 19, 1117 (1974)
- 23 *Behrisch, R.* Oberflächenerosion der inneren Wand eines Fusionsreaktors
Verh. DPG (VI) 9, 873 (1974)
- 24 *Behrisch, R.*
*Gähler, R.**
*Kalus, J.** Sputtering Yields of Au by 14 MeV Neutrons and Emission of Recoils from (n, 2n) Reactions in Au and Nb
J. Nucl. Mat. 53, 183 (1974)
- 25 *Behrisch, R.*
*Gähler, R.**
*Kalus, J.** Zerstäubungsmessungen an Gold mit 14 MeV Neutronen
Verh. DPG (VI) 9, 713 (1974)
- 26 *Behrisch, R.*
*Kadomtsev, B. B.** Impurities
Nucl. Fusion Suppl. (Fusion Reactor Design Problems) 451 (1974)
- 27 *Behrisch, R.*
*Kadomtsev, B. B.** Impurities in Plasma and their Implication with Respect to Fusion Reactors
Proc. 5th Conf. Plasma Phys. and Fusion Research Tokyo (1974), paper CN 33/S-2

- 28 *Ben Shaul, A.
Kompa, K. L.
Schmailzl, U.* Closed-form Description of the Primary Energy Distribution over Vibration and Rotation in HF Chemical Laser: A Theoretical and Experimental Study
Proc. VIII Intern. Quant. Electronics Conf., San Francisco Digest of Technical Papers, IEEE, N. Y. (1974), p. 77
- 29 *Biskamp, D.
Eidmann, K.
Sigel, R.
Welter, H.* Backscatter from a Laser-produced Plasma in Numerical Simulation and Experiment
Am. Phys. Soc. 19, 919 (1974)
- 30 *Biskamp, D.* Weak Turbulence Theory (Wave-Particle Effects)
Proc. of Culham-SRC Symposium on Turbulence and Non-Linear Effects in Plasmas ed. by B. E. Keen and E. W. Laing, P. 93 (1974)
- 31 *Biskamp, D.* Theoretical Aspects of Turbulent Heating Plasmas
Proc. of Culham-SRC Symposium on Turbulence and Non-Linear Effects in Plasmas ed. by B. E. Keen and E. W. Laing, p. 433 (1974)
- 32 *Biskamp, D.
Welter, H.* Numerical Studies of Anomalous Absorption and Reflection of Light in Laser Produced Plasmas
5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), paper CN-33-F5-1
- 33 *Blaumoser, M.
Duesing, G.
Grieger, G.
Jaenicke, R.
Junker, J.
Kolos, J.
Meyer, P.
Streibl, B.
Wolf, G. H.* On the Technical Concept of the W VII Stellarator
Proc. of the 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 75 (1974)
- 34 *Blaumoser, M.
Duesing, G.
Grieger, G.
Junker, J.
Rau, F.
Wolf, G. H.* Status of Wendelstein VII (W VII)
Proc. of the 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 75 (1974)
- 35 *Braun, W.* Measurement of Time Dependent Elliptical High-Beta Plasma Deformations by Means of Holographic HF-Laser Interferometer
Phys. Letters 47A, 144 (1974)
- 36 *Braun, W.* Messung von Dichteprofilen mittels holographischer IR-Interferometrie an ISAR T1
DPG (VI), 9, 473 (1974)
- 37 *Braun, W.
Correa, D.
Engelhardt, W.
Fünfer, E.
Gruber, J.
Herrnegger, F.
Kaufmann, M.
Koeppendörfer, W.
Lortz, D.
Lotz, W.
Münich, M.
Neuhauser, J.
Schneider, W.
Schramm, G.
Seidel, U.
Sommer, J.* Garching Toroidal High-Beta-Stellarator Experiments
5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), paper CN-33/E2
- 38 *Brederlow, G.
Witte, K. J.
Zinko, Z.** Performance of a Faraday Rare Gas Alkali MHD Generator AIAA J. 12, 481 (1974)
- 39 *Brederlow, G.
Witte, K. J.* Effective Electrical Conductivity and Related Properties of a Nonequilibrium High Pressure MHD Plasma
AIAA J. 12, 83 (1974)

- 40 *Breit, E.*
Gruber, J. E.
Kaufmann, M.
Münich, M.
Preis, H.
Schneider, W.
Schramm, G.
Seidel, U.
The Development Program for the 16 m Diameter High-Beta-Stellarator HBS II
Proc. of the 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182e, 247 (1974)
- 41 *Breit, E.*
Gruber, J.
Herppich, G.
Suess, R.
Werner, F.
Wilhelm, R.
Technical Aspects of the Garching Belt Pinch-Experiments
8th Symp. Fusion Technology, EUR 5782e, 265 (1974)
- 42 *Brinkschulte, H.*
Perchermeier, J.
*Schimitschek, E.**
Repetitively Pulsed q-switched Inorganic Liquid Laser
J. Phys. D. (Appl. Phys.) 7, 1361 (1974)
- 43 *Brinkschulte, H.*
Lang, R. S.
Verstärkung für Rotationsschwingungsübergänge bei einem TEA-CO₂-Laser
Verh. DPG 7, 537 (1974)
- 44 *Brinkschulte, H.*
Lang, R. S.
Gain Measurements in a TEA-CO₂ Laser
Phys. Lett. 47A, 455 (1974)
- 45 *Bünde, R.*
Dänner, W.
Hofer, W.
Hüls, M.
Pöhlchen, R.
Söll, M.
Taglauer, E.
Weichselgartner, H.
Aspekte der Energieversorgung mit Fusionsreaktoren
Brennstoff-Wärme-Kraft 26, 467 (1974)
- 46 *Bünde, R.*
„Memorandum über die technologischen Probleme des Fusionsreaktors“ und das „Fusionsreaktor-Technologieprogramm“/Brennstoff-Wärme-Kraft 26, 352 (1974)
- 47 *Cassedy, E. S.**
Mulser, P.
Absolute Instability Thresholds for Parametric-Decay Interactions in Plasma
Phys. Rev. 10, 2349 (1974)
- 48 *Chodura, R.*
Röthlein, B.
Ion Heating in a Strong Magnetic Compression Wave
6th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow 2, 379 (1974)
- 49 *Chodura, R.*
Dum, C. T.
Keilhacker, M.
Kornherr, M.
Niedermeyer, H.
Protz, R.
Söldner, F.
Steuer, K.-H.
Numerical and Experimental Result on the Production of Weakly Compressed Thermo-nuclear Plasmas in the Garching High-Voltage Theta and Belt Pinch
5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), Paper CN-33/E8-6
- 50 *Coburn, J. W.**
Taglauer, E.
*Kay, E.**
Glow-Discharge Mass Spectrometry Technique für Determining Elemental Composition Profiles in Solids
J. Appl. Phys. 45, 1779 (1974)
- 51 *Cordey, J. G.**
*Hugill, J.**
*Paul, J. M. W.**
*Sheffield, J.**
Speth, E.
*Stott, P. E.**
*Tereshin, V. I.**
Injection of a Neutral Particle Beam into a TOKAMAK: Experiment and Theory
Nucl. Fusion Lett. 14, 441 (1974)
- 52 *Corti, S.*
Klüber, O.
Sesnic, S.
Gernhardt, J.
Lisitano, G.
Karger, F.
Meisel, D.
TOKAMAK-Entladungen mit programmierten Vertikalfeldern an PULSATOR I
Verh. DPG 7, 478 (1974)

- 53 Corti, S. Plasmadichteprofил-Messungen im PULSATOR I
Lisitano, G. Verh. DPG 7, 478 (1974)
Rossetti, E.
- 54 Croci, R. Linear Stability of Modulated Plasma Profiles
Saison, R. Plasma Physics 16, 603 (1974)
- 55 Dänner, W. Die MHD-Druckverluste als ein mögliches Kriterium für die Strukturmaterial-Auswahl für
Fusionsreaktor-Blankets Reaktortagung Berlin (1974), paper No. 408
- 56 Dänner, W. Tritium Economy of Fusion Power Plants
Proc. of the 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182e, 747 (1974)
- 57 Dänner, W. Problems of Tritium Production, Radiation Damage and Neutron Activation in Blankets of
Pulsed Fusion Reactors
Intern. School of Fus. React. Technol., Course on Pulsed Reactors, Erice (1974), paper No. II 14
The Effect of Finite Chemical Reaction Rates on Heat Transfer to the Walls of Combustion
Driven Supersonic MHD Channels
AIAA J. 12, 403 (1974)
- 58 Daily, J. W.*) Excitation of Plasma Waves by Gaps and Slow-wave Structures
Raeder, J. Int. School of Plasma Physics, Symp. on "Plasma Heating in Toroidal Devices", Varenna,
Zankl, G. Italy, Sept. 4-17, (1974) p. 91
- 59 Derfler, H. A Systems Analysis Approach to R. F. Plasma Heating
Bull. Am. Phys. Soc. 859 (1974)
- 60 Derfler, H. Helical Plasma Structure observed in a Hard-Core Theta Pinch
Phys. Fluids 17, 124 (1974)
- 61 Düchs, D. F. Radiation Losses from Non-Stationary Plasmas due to Oxygen Impurities
Dixon, R. H.*) Nucl. Fusion 14, 73 (1974)
Elton, R. C.*)
- 62 Düchs, D. F. On the Impurity Problem on Quasi-Steady-State Toroidal Plasma Experiments and Fusion
Engelhardt, W. Reactors
Koeppendorfer, W. J. Nucl. Mat. 53, 102 (1974)
- 63 Düchs, D. F. Effect of Wall Sputtering on Plasma under Fusion Reactor Conditions
Haas, G. Proc. 8th Symp. Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 697 (1974)
Pfirsch, D.
Vernickel, H.
- 64 Düchs, D. F. Neoclassical Diffusion and the Influence of α -Particles on the Energy Balance in Large
Haas, G. TOKAMAKS and Fusion Reactor Plasmas
Pfirsch, D. 5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), paper CN-33/A17-1
- 65 Düchs, D. F. Radial Transport of Ions in TOKAMAK Including Diffusing Oxygen and Carbon Impurities
Pfirsch, D. 6th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 2, 326 (1974)
- 66 Düchs, D. F. Turbulent Heating and Quenching of the Ion Sound Instability
Furth, H. P.*) Phys. Rev. Lett. 32, 1231 (1974)
Rutherford, P. H.*)
- 67 Dum, C. T. Schnelle magnetische Kompression in Metallwandgefäßen
Chodura, R. DPG (VI) 9, 488 (1974)
Biskamp, D.
- 68 Eberhagen, A. On the Efficiency of Various Divertors for Screening a Fusion Plasma
Herold, H. 6th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 2, 381 (1974)
- 69 Eckhartt, D. Fusion durch Hochleistungs-Laser
Haas, G. Atomwirtschaft XIX, 451 (1974)
Hagenow, K.-U. v.
- 70 Eidmann, K. Zeit- und ortsaufgelöste Messungen der Röntgenemission an lasererzeugten Plasmen
Key, M. H. Verh. DPG 7, p. 58, 498 (1974)
Sigel, R.
- 71 Eidmann, K. Erzeugungsmechanismus der 2. Harmonischen der Laserstrahlung in einem inhomogenen
Sigel, R. lasererzeugten Plasma
Verh. DPG 7, p-57, 497 (1974)
- 72 Eidmann, K. Backscatter Experiments Laser Interaction and Related Plasma Phenomena
Sigel, R. 3B, 667 (1974)
- 73 Eidmann, K. Cooling Systems of the W VII Stellarator
Sigel, R. 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182e, 81 (1974)
- 74 Elsner, A. Differenzverfahren für Diffusionsgleichungen der Plasmaphysik
Lect. Notes in Mathematics, Springer Verlag Heidelberg, p. 395 (1974)
- 75 Finckenstein, K. v. Düchs, D. F.

- 76 Fink, J.
Herrmann, W.
Ott, W.
Petersen, J. M.*)
Energy Spreading and Energy Loss Due to Negative Mass Instability in an Electron Ring Experiment
Proc. IXth Int. Conf. on High Energy Accelerators Stanford, Cal. May 2-7, 223 (1973)
- 77 Freudenberger, K.
Lohnert, H.
8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout EUR 5182e, 109 (1974)
- 78 Fünfer, E.
Kaufmann, M.
Lotz, W.
Neuhauser, J.
Ergebnisse am Hoch-Beta-Stellarator ISAR T1
DPG (VI) 9, 472 (1974)
- 79 Fünfer, E.
Kaufmann, M.
Lotz, W.
Neuhauser, J.
Schramm, G.
Recent Results from the Garching High-Beta Stellarator Torus ISAR T1 (Part II)
6th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 2, 336 (1974)
- 80 Fuss, W.
Hohla, K.
81 Gehre, O.
Druckverbreiterung des Jodlaserübergangs bei 1,315 μm
Verh. DPG 7, Q-43, 538 (1974)
A Heterodyne Detection Scheme for Coherent HCN-Laser Scattering from Waves and Fluctuations in Thermonuclear Plasmas
Conf. Rigest, Int. Conf. on Submillimeter Waves and Their Applications, Atlanta, Georgia, USA, June 12-14 (1974), p. 149
- 82 Gehre, O.
A Heterodyne Detection System for Measurements in Collective HCN Laser Scattering from Thermonuclear Plasmas
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT 22, 1061 (1974)
- 83 Gierke, G. v.
Review of Low- β Toroidal Machines.
Reprinted from the Course of Instabilities and Confinement in Toroidal Plasmas, Varenna, EUR 5064e, PSV No. 71090191-193-242, (1971) erschienen 1974
- 84 Gondhalekar, A.*)
Heckenberg, N. R.
Holzhauer, E.*)
Single Longitudinal Mode Operation of High Pressure Pulsed CO₂ Lasers
Phys. Lett. 46A, 229 (1973)
- 85 Green, B. J.
Hagenow, K.-U. v.
Zehrfeld, H. P.
Arbitrarily Shaped Resistive TOKAMAK Equilibria
6th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 2, 355 (1974)
- 86 Green, B. J.
Pfirsch, D.
Saison, R.
Wimmel, H. K.
Marty, D.*)
Transport in Large TOKAMAKS Induced by Trapped-Particle Instabilities
5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), paper CN-33/A 14-1
- 87 Grieger, G.
Hacker, H.
Pacher, G.
Rehker, S.
Renner, H.
Ringler, H.
Würsching, E.
Energy Containment in the WENDELSTEIN II B Stellarator with Ohmic Heating
6th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 2, 334 (1974)
- 88 Grieger, G.
Die Technologie des Fusionsreaktors (Fusion Reactor Technology)
Umschau 74, 295 (1974)
- 89 Gruber, O.
Wilhelm, R.
Zwicker, H.
Erste Untersuchungen am 800 kJ Belt Pinch II Verh. DPG (VI) 9, 474 (1974)
- 90 Gruber, O.
Becker, G.
Herold, H.
Aspects of Dynamic Stabilization of High-Beta Plasmas (Part II)
6th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 2, 363 (1974)
- 91 Grundner, M.
Heiland, W.
Taglauer, E.
Direct Comparison of Ion Scattering and Secondary Ion Emission as Tools for Analysis of Metal Surfaces
Appl. Phys. 4, 243 (1974)
- 92 Hacker, H.
Pacher, G.
Renner, H.
Rehker, S.
Ringler, H.
Würsching, E.
Ohm'sche Heizung im WENDELSTEIN-Stellarator W II b
Verh. DPG 7, 471 (1974)

- 93 *Hacker, H.* Bestimmung der Teilcheneinschlußzeiten am W II b Stellarator
Mahn, C. Verh. DPG 7, 471 (1974)
Renner, H.
Rehker, S.
Ringler, H.
Würsching, E.
- 94 *Hacker, H.* Ohmic-Heated Plasma in the W II b Stellarator
Pacher, G. Bull. am. Phys. Soc. 19, 905 (1974)
Rehker, S.
Renner, H.
Ringler, H.
Würsching, E.
- 95 *Häglsperger, H.* Vacuum System of the W VII b Stellarator
Heiland, W. 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 99 (1974)
Poschenrieder, W.
Scherzer, R.
- 96 *Hagenow, K.-U. v.* A Concept for a Moving Magnetic Limiter
Lackner, K. Bull. Am. Phys. Soc. 19, 852 (1974)
- 97 *Heckenberg, N. R.* Mechanism of the Single Frequency Continuous Pulsed CO₂ Laser
 Verh. DPG 7, p-60, 498 (1974)
- 98 *Heiland, W.* Interaccion de Particulas con Superficies / Particle Interaction with Surfaces, Surface
 Investigations by Ion Scattering and Secondary Ion Mass Spectroscopy
 Electron Fisc. Apl. 17, 151 (1974)
- 99 *Heiland, W.* Ein Beitrag zur Desorption durch Ionenbeschuß
Taglauer, E. Dechema-Jahrestagung, 89 (1974)
- 100 *Heiland, W.* Surface Scattering of Low Energy Ions
Schäffler, H. G. Atomic Collisions in Solids 2, 597 (1974)
Taglauer, E.
- 101 *Herrnegger, F.* Stability of Exact Toroidal MHD Equilibrium with Non-Circular Cross-Section
*Maschke, E. K.** Nucl. Fusion 14, 119 (1974)
- 102 *Hofer, W. O.* Anisotropic Emission in Single Crystal Sputtering
 Gen. Meeting Danish Soc. for the Physics and Chemistry of Condensed Matter, Helsingor,
 May (1974) Paper No. F6
- 103 *Hofer, W. O.* Distortion of Sputtering Spot Patterns of Single Crystals Due to Incomplete Condensation
 Radiat. Eff. 21, 141 (1974)
- 104 *Hofer, W. O.* Analysis of Solids with Electron and Ion Microprobes (inv.)
 Gen. Meeting Danish soc. for the Physics and Chemistry of Condensed Matter, Helsingor,
 May (1974), paper No. A3.
- 105 *Hoffmann, F. M.* Excitation of Parametric Instabilities in Statically Stable and Unstable Fluid Interfaces
Wolf, G. H. J. Appl. Phys. 45, 9 (1974)
- 106 *Hofman, I.* Self-consistent Equilibria of Accelerated Relativistic Electron Rings
 Proc. IXth Int. Conf. on High Energy Accelerators
 Stanford, Cal. May 2-7, 245 (1974)
- 107 *Hohla, K.* Iodine Laser Technology
 Abstracts 2nd European Electro-Optics Conference, Montreux, Schweiz, April (1974), paper
 XII/IV
- 108 *Hohla, K.* The Iodine Laser, a High Power Gas Laser
 Laser Interaction and Related Plasma Phenomena 3A, 133 (1974)
- 109 *Hohla, K.* Parametric Studies of a 60 J – 1 ns Iodine Laser
Volk, R. Proc. VIII International Quantum Electronics Conf., San Francisco, Cal. Juni (1974), paper
Witte, K. J. 6 B. 6
Fuss, W.
- 110 *Hora, H.* Striated Jets and Anomalous Absorption Due to Nonlinear Ponderomotive Forces in Laser
 Produced Plasmas
 Laser Interaction and Related Plasma Phenomena 3A, 315 (1974)
- 111 *Hora, H.* Momentum of Photons and the Nonlinear Force of Laser-Plasma Interaction
 Phys. Fluids 17, 1042 (1974)
- 112 *Jaenicke, R.* Ohmic Heating and Vertical Field Coil System of W VII
Kunze, R. C.
Lohnert, H.
Müller, G. 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 119 (1974)

- 113 Jäckel, H. J.
Kiblinger, J.
Rau, F.
Wobig, H.
Torus with Helix W VII A
8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 235 (1974)
- 114 Jäckel, H. J.
Kiblinger, J.
Rau, F.
Performance of Medium-Sized Nb₃Sn in He Gas up to 17 K
IEEE Proc. 5th Symp. on Engineering Probl. of Fusion Res. p. 582 (1974)
- 115 Karger, F.
Wobig, H.
Corti, S.
Gernhardt, J.
Klüber, O.
Lisitano, G.
McCormick, K.
Meisel, D.
Sesnic, S.
Influence of Resonant Helical Fields on Tokamak Discharges
Proc. 5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), paper PD-2
- 116 Katzmarek, E.
Müller, G.
Some Experiments on HV DC Interruption
3rd Intern. Conf. Gas Discharges p. 478 (1974)
- 117 Keilhacker, M.
Kornherr, M.
Niedermeyer, H.
Söldner, F.
Steuer, K.-H.
Flute Instabilities During Fast Magnetic Compression of Collisionless $\beta = 1$ Plasma
Phys. Rev. Lett., 32, 1044 (1974)
- 118 Keilhacker, M.
Kornherr, M.
Niedermeyer, H.
Söldner, F.
Steuer, K.-H.
Flute-Instabilitäten bei der schnellen magnetischen Plasmakompression
Verh. DPG (VI) 9, 487 (1974)
- 119 Keilhacker, M.
Kornherr, M.
Niedermeyer, H.
Söldner, F.
Steuer, K.-H.
The Production of Weakly Compressed High-Beta Plasmas by Shock Heating in High-Voltage Theta Pinches
6th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 2, 377 (1974)
- 120 Kerner, W.
Tasso, H.
Kink Instabilities for Shaped Tokamaks in Toroidal Geometry,
Proc. 5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), paper CN-33/A13-1
- 121 Kessel, C. van
Sigel, R.
Observation of a Laser-Induced Compression Wave in a Solid Target
Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, 3B, 547 (1974)
- 122 Kessel, C. van
Sigel, R.
Experimentelle Untersuchung von Lasergetriebenen Stoßwellen in Festkörpern
Verh. DPG 7. p-55, 496 (1974)
- 123 Kessel, C. G. M. van
Sigel, R.
Observation of Laser Driven Shock Waves in Solid Hydrogen
Phys. Rev. Lett. 33, 1020 (1974)
- 124 Key, M. H.*)
Eidmann, K.
Dorn, Ch.
Sigel, R.
Time resolved X-ray Measurements on Laser Produced Plasmas
Appl. Phys. Lett. 25, 335 (1974)
- 125 Key, M. H.*)
Eidmann, K.
Dorn, C.
Sigel, R.
Space resolved X-ray Measurements on Laser Produced Plasmas
Phys. Lett. 48A, 121 (1974)
- 126 Klement, G.
Wedler, H.
A Compact and Economic Capacitor Bank for Pumping the 1000 J-Laser „ASTERIX“ at Garching
Proc. of the 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 327 (1974)
- 127 Klüber, O.
Corti, S.
Karger, F.
Lisitano, G.
Meisel, D.
Sesnic, S.
Well Centered Discharges in the PULSATOR I TOKAMAK
Proc. 5th Conf. on Plasma and Fusion Research. Tokyo (1974), paper A 8-2
- 128 Klüber, O.
Ergebnisse am TOKAMAK-Experiment in Garching
Verh. DPG 7, 477 (1974)
- 129 Knobloch, A.
Wo steht die Fusionsreaktorenentwicklung heute?
Mitteilungen aus der Max-Planck-Gesellschaft 5, 342 (1974)

- 130 *Knobloch, A.* Large Flywheel Power Supply for Fusion Experiments in the Max-Planck-Institut für Plasma-physik, Garching/Germany
Kottmair, M.
Schlüter, W.)* Proc. of the 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 361 (1974)
Vau, G.)*
- 131 *Kompa, K. L.* Laser-induzierte chemische Prozesse
 Verh. DPG 7, H-4, 383 (1974)
- 132 *Kompa, K. L.* Laser-induced Chemical Changes and isotope Separation by Lasers
 Abstracts 2nd European Electro-Optics Conference Montreux, Schweiz (1974), paper III
- 133 *Kompa, K. L.* High Power Chemical Lasers: Problems and Perspectives Laser Interaction and Related Plasma Phenomena 3A, 115 (1974)
- 134 *Kornherr, M.* Vorionisierung für das 250 kV-Belt-Pinch-Experiment
Niedermeyer, H. Verh. DPG (VI), 487 (1974)
Steuer, K.-H.
- 135 *Krause, H.* Gleichgewichtsform and Stabilitätsgrenzen bei einem toroidalen Plasma mit nicht-kreisförmigem Querschnitt
Wilhelm, R. Verh. DPG, (VI) 9, 474 (1974)
Zwicker, H.
- 136 *Küppers, G.* Injection of Relativistic Electron Beams with Arbitrary Radial Profiles into Warm Collisional Plasmas
Salat, A. Plasma Physics 16, 317 (1974)
Wimmel, H. K.
- 137 *Küppers, G.* Difficulties with Injection of Relativistic Elektron Beams into Toroidal Fusion Devices
Salat, A. Phys. Lett. A46, 195 (1973)
Wimmel, H. K.
- 138 *Lackner, K.* Displace Instability of Numrically Computed Plasma Equilibria
MacMahon, A. B.)* Sherwood Meet., April 3–5, (1974)
 Proc. of Annual Meeting on Theoretical Aspects of Controlled Thermonuclear Research, Berkley, S. 53
- 139 *Lackner, K.* Numerical Study of Displacement Instability in Elongated TOKAMAK, Nucl. Fusion 14, 575 (1974)
MacMahon, A. B.)*
- 140 *Lackner, K.* Hydrodynamik der Laserfusion – Verh. DPG IV 7, 383 (1974)
- 141 *Lallia, P. P.* A LHR Slow Wave Launching Structure suited for Large Toroidal Experiment
 2nd Symp. on Plasma Heating in Toroidal Devices, Varenna (1974)
 Topical Conf. on Plasma Heating, Lubbock, Texas (1974)
- 142 *Liebl, H.* Static Mass Spectrometers with Axial Symmetry
 Adv. in Mass Spectrom 6, 535 (1974)
- 143 *Liebl, H.* Quadropole Secondary Ion Mass Spectrometry Apparatus with Enhanced Transmission
 Int. J. Mass Spectrometry and Ion Phys. 15, 116 (1974)
- 144 *Liebl, H.* Ion Microprobe Analysers – History and Outlook
 Anal. Chem. 46, 22 A (1974)
- 145 *Lisitano, G.* RF-Vorionisation im TOKAMAK PULSATOR I
Corti, S. Verh. DPG 7, 478 (1974)
- 146 *Lotz, W.* High-Bata Plasmas – Present State and Prospects
 6th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 2, 109 (1974)
- 147 *Lortz, D.* MHD Stable Axisymmetric Equilibria
Nührenberg, J. Proc. 5th Conf. on Plasma Physic and Fusion Research Tokyo (1974), paper CN-33/A12-2
- 148 *Ludwig, D.* Observation of Nonthermal Electron Density Fluctuations by Light Scattering
Mahn, C. Plasma Phys. 16, 69 (1974)
Eschlwech, A.
Voigt, P.
- 149 *Meade, D. M.*)* The Effects of Impurities and Magnetic Divertors on High-Temperature Tokamaks
Furth, H. P.)* Proc. 5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), paper CN-33/A15-4
Rutherford, P. H.)*
Seidl, F. G. P.
Düchs, D. F.
- 150 *Meischner, P.* Energy Distributions of Charged and Neutral Hydrogen Atoms Backscattered from Metal Surfaces Bombarded with 5 to 18 keV Protons
Verbeek, H. J. Nucl. Mat. 53, 276 (1974)
- 151 *Meischner, P.* Energie- und Ladungsverteilung rückgestreuter Teilchen beim Beschuß von Metalloberflächen mit Protonen
Verbeek, H. Verh. DPG (VI) 9, 714 (1974)
- 152 *Meisel, D.* Messung der Elektronentemperatur durch Streuung von Laserlicht am PULSATOR I – TOKAMAK
 Verh. DPG 7, 479 (1974)

- 153 *Meisel, D.* Measurement of the Average Impurity-Level of a Tokamak Discharge (Pulsator) by Thomson-Scattering
Proc. APS Meeting Albuquerque
Bull. Am. Phys. Soc.
- 154 *Mulser, P.* Elektronentemperaturabhängigkeit von der Laserintensität in Experiment und Rechnung
Verh. DPG 7, p-56, 497 (1974)
- 155 *Muntenbruch, H.* Strom für die Plasmaphysik – Strom aus dem Plasma (Power for Plasma Physics – Power from Plasma)
Kerntechnik 7, 296 (1974)
- 156 *Nakamura, T.* Stability of Nonequilibrium MHD Plasma in the Regime of Fully Ionized Seed
AIAA 12, 661 (1974)
- 157 *Nakamura, R.* Hydrogen-Oxygen Closed Cycle MHD Power Generation System Based upon Thermochemical Decomposition of Water
Proc. 14th Symposium Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics, Tullahoma (1974), paper III 6
- 158 *Neuhauser, J.* Zur Einstellung des Gleichgewichts am Hoch-Beta-Stellarator ISAR T1
Verh. DPG (VI) 9, 472 (1974)
- 159 *Ott, W.* Radial Two-Stream Instability at Rollout and Spillover of a Relativistic Electron Ring.
Laslett, L. J. Lawrence Berkeley Laboratory, ERAN-234, March 1 (1974)
Amerik. Laborbericht in der Handbibliothek d. R. P.
- 160 *Pfirsch, D.* Classes of Simple Analytic Axisymmetric Equilibria
Rebhan, E. Nucl. Fusion 14, 547 (1974)
- 161 *Pfirsch, D.* Fusion Research Programm of the Federal Republic of Germany
Gierke, G. v. Comments on Plasma Physics and Controlled Fusion, 1, 203 (1972) (erschienen 1974)
- 162 *Preis, H.* Das transiente Verhalten von Strömen und Kräften im toroidalen Spulensystem des Stellarators WENDELSTEIN VII insbesondere bei Betriebsstörungen
Archiv f. Elektrotechnik 56, 120 (1974)
- 163 *Proch, D.* Ein kontinuierlich arbeitender chemischer Laser hoher Leistung mit variablem Viellinienspektrum
Verh. DPG 7, Q-45, 538 (1974)
- 164 *Puri, S.* Lower-hybrid Dispersion Characteristics in a Hot Plasma
Tutter, M. Am. Phys. Soc. 00, 961 (1974)
- 165 *Puri, S.* Absorption of the Lower-Hybrid Wave in a Thermonuclear Plasma
Int. School of Plasma Physic. Symposium on „Plasma Heating in Toroidal Devices“, Varenna, Italy, September 4–17 (1974) p. 83
- 166 *Puri, S.* Slow-wave Coupling to the Lower-Hybrid Resonance
Tutter, M. Nuclear Fusion 14, 93 (1974)
- 167 *Puri, S.* Stochastic Heating of Plasma Electrons Using Micro-Wave Noise
Plasma Phys. 16, 517 (1974)
- 168 *Raeder, J.* Treatment of the Magnetically Deflected, Wall-Stabilized Arc by Means of Green's functions
Gorenflo, H. H. Phys. of Fluids 17, 137 (1974)
*Seeger, G.**)
- 169 *Rehker, S.* The Effect of Perturbations on the Magnetic Field of the W VII-Stellarator
Wobig, H. 8th Symp. on Fusion Technology, Noodwijkerhout, EUR 5182 e, 221 (1974)
- 170 *Röhr, H.* Resonance Reflectro for Suppressing Undesired Rotational Lines from Te₂ CO₂ Lasers
Kellerer, L. Appl. Phys. Letter 24, 124 (1974)
- 171 *Röhr, H.* Temperaturmessung an heißen Plasmen (The Measurement of Hot Plasma Temperatures)
Kerntechnik 16, 301 (1974)
- 172 *Roth, J.* Blasenbildung auf Niob-Oberflächen bei Beschuß mit He-Ionen
Behrisch, R. Verh. DPG (VI) 9, 713 (1974)
Scherzer, B. M. U.
- 173 *Roth, J.* Determination of the Depth Distribution of Implanted Helium Atoms in Niobium by Rutherford Backscattering
Behrisch, R. Appl. Phys. Lett. 25, 643 (1974)
Scherzer, B. M. U.
- 174 *Roth, J.* Blistering of Niobium Due to Low Energy Helium
Behrisch, R. Ion Bombardment Investigated by Rutherford Backscattering
Scherzer, B. M. U. Applications of Ion Beams to Metals (ed. by S. T. Picraux, E. P. Eer Nisse and F. L. Vook), Plenum Publ. Comp. (1974), p. 573
- 175 *Roth, J.* Blistering of Niobium Due to 0,4 to 9 keV Helium and Hydrogen Bombardment
Behrisch, R. J. Nucl. Mat. 53, 147 (1974)
Scherzer, B. M. U.

- 176 Roth, J.
Behrisch, R.
Scherzer, B. M. U.
Pohl, F.
177 Scherzer, B. M. U.
178 Schilling, G.
179 Schlüter, A.
180 Schmitter, K. H.
181 Schmitter, K. H.
182 Schneider, W.
Bateman, G.
183 Schwenn, U.
Sigel, R.
184 Seidel, E. R.
185 Sesnic, S.
Fujita, J.
186 Sesnic, S.
187 Sigel, R.
188 Söll, M.
189 Söll, M.
Van der Klein, C. A. M.
Bauer, H.
Vogl, G.
190 Staib, P.
Kirschner, H.
191 Staudenmaier, G.
192 Steuer, K.-H.
193 Steuer, K.-H.
194 Taglauer, E.
195 Tutter, M.
Puri, S.
196 Verbeek, H.
Eckstein, W.
197 Vernickel, H.
198 Vernickel, H.
- Temperature and Dose Dependence of Radiation Damage and Blister Formation in Niobium Due to 0.5 to 9 keV Helium Bombardment
Proc. 8th Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 841 (1974)
Oberflächenphysikalische Untersuchungen zum Wandproblem in der Plasmaphysik
Verh. DPG (VI), 9, 494 (1974)
Leistungsstarke Neutralteilchenstrahlen für die Fusionsforschung (High Power Neutral Particle Beams for Fusion Research)
Kerntechnik 16, (1974), No. 7, p. 309
Die Bedeutung der Erhaltung der Energie (Significance of Energy Conservation)
Plenarvorträge der Physikertagungen 11, 107 (1974)
Planned and Running Activities in the Field of Fusion Reactor Technology in the FRG
Proc. of the First Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion, San Diego I, p. 137 (1974)
Bauarten, Stand und Probleme der Fusionsreaktoren
VDI-Berichte 208, 61 (1974)
MHD Instabilities on an Initial Value Problem for Elongated Cross Sections
5th Conf. on Plasma Physics and Fusion Research, Tokyo (1974), paper CN-33/A 12-1
Eine kontinuierliche Teilchenquelle für die Erzeugung von Plasma mit Pulslasern
J. of Physics E (Sci. Instruments) 7, 715 (1974)
Technische Probleme bei Großexperimenten zur Kernfusion
(Technical Problems in Large Nuclear Fusion Experiments)
Kerntechnik 16, (1974), No. 7, p. 289
Messungen weicher und harter Röntgenstrahlung am Tokamak
Verh. DPG 7, 479 (1974)
The Evolution of High-Z Impurities in Pulsator Tokamak
Bull. Am. Phys. Soc. , (1974)
Kernfusion mit Lasern
Umschau 12, 386 (1974)
The Influence of Low Temperature Neutron Irradiation on the Properties of Hord Superconductors
Proc. of the 8th Symp. on Fusion Technology,
Noordwijkerhout, EUR 5182 e, 965 (1974)
The Influence of Low Temperature Neutron Irradiation on Superconducting Magnet Systems for Fusion Reactors
Applied Superconductivity Conference, Oakbrook 30. 9.–2. 10. (1974), paper Q-4
Absolute Atomic Densities Determined by Auger-Electron-Spectroscopy
Appl. Phys. 3, 421 (1974)
Energie- und Winkelverteilung zerstäubter ein- und mehratomiger Wolframionen
Verh. DPG (VI), 9, 714 (1974)
Schnelle Stoßwellenheizung bei Fusionsexperimenten
Verh. DPG (VI) 9, 486 (1974)
Der Wasserstoffreaktor – Probleme bei der Erschließung einer neuen Energiequelle
Akademiker-Information IV, 1 (1974)
Analysis of Solid Surfaces by Low Energy Ion Bombardment (inv.)
Conference on Electrode Phenomena in Gas Discharges,
Bukarest, 30. 5.–1. 6. (1974)
Lower-hybrid Wave Absorption in a Hot Plasma
Am. Phys. Soc. , 860 (1974)
Radiation Blistering after H⁺, D⁺ and He⁺ Ion Implantation into Surfaces of Stainless Steel, Mo and Be
Applications of Ion Beams to Metals, (ed. by S. T. Picraux, E. P. Eer Nisse and F. L. Vook),
Plenum Publ Corp. (1974), p. 597
Plasma-Wall-Interaction in Magnetically Confined Toroidal Fusion Reactors – Status and Problems
Proc. 1st Topical Meeting on the Technology of Contr. Nucl. Fusion, USA, E. C. Conf. –
7404402 – P2, (1974), p. 347
Experimental Investigations for Plasma-Wall-Interaction in Fusion Experiments (inv.)
2nd European Study Conf. on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases, Innsbruck,
Sept. (1974)
Book of Abstracts, p. 63

- 199 *Weichselgartner, H.* Contributions to the Diffusion of Tritium from Liquid Lithium through Niobium
8th Symp. Fusion Technology, EUR 5182 e, 753 (1974)
- 200 *Wegrowe, J. G.* Stellarator for RF Heating Studies
2nd Symp. on Plasma Heating in Toroidal Devices, Varenna (1974)
- 201 *Werner, F.* A Servo-Plotting System for Determining Spatial Potential Field Distributions in an Electrolytic Tank
ETZ-A 95, 2 (1974)
- 202 *Wesner, F.* ASDEX, a Tokamak with Axisymmetric Divertor
Allgeyer, R.
Feneberg, W. Proc. VIII Symp. on Fusion Technology, Noordwijkerhout
Haas, G. EUR 5128 e, 317 (1974)
Herppich, G.
Keilhacker, M.
Preis, H.
- 203 *Weynants, R. R.* Ion Heating at Twice the Ion-Cyclotron Frequency in Reactororiented Machines
Phys. Rev. Lett. 33, 78 (1974)
- 204 *Wienecke, R.* Der Fusionsreaktor: Physikalische und technische Probleme
Plenarvorträge der Physikertagungen 11, 123 (1974)
- 205 *Witkowski, S.* Laser-Kernfusion
Physik in unserer Zeit 5, 147 (1974)
- 206 *Wobig, H.* Wege zur kontrollierten Kernfusion
Die Naturwissenschaften 61, 97 (1974)
- 207 *Zankl, G.* Results of the IPP Test Generator and the Design of a 10 MW_{el} Short-Time Combustion MHD
Raeder, J. Generator
Bünde, R.
Muntenbruch, H. Proc. 14th Symp. on Eng. Aspects of MHD
Dorn, CH. Tullahoma/Tennessee, USA (1974) paper I 1.1
Volk, R.

HABILITATION

- 208 *Raeder, J.* Theoretische Grundlagen und Zahlenwerte für Verbrennungs-MHD-Generatoren
TU München (1974)

DIPLOMARBEITEN

- 209 *Bergmann, R.* Bestimmung der Neutralteilchendichte eines Deuteriumplasmas mit Hilfe optischer Absorptionsmessungen in Vakuum UV
TU München (1974)
- 210 *Gähler, R.* Zerstäubung von Gold mit 14 MeV Neutronen
TU München (1974)
- 211 *Grönberg, R.* Untersuchung der Magnetfeldkonfiguration an einem Belt-Pinch Modell
TU München (1974)
- 212 *Haering, T.* Interferometrische Dichtemessungen an lasererzeugten Plasmen
TU München (1974)
- 213 *Schmailzl, U.* Schwingungsrotations-Energieverteilung und Relaxationsprozesse im HF-Laser
Universität München (1974)
- 214 *Schmitt, J.* Absolute Strahlungsmessung an einem Belt-Pinch
TU München (1974)

DISSERTATIONEN

- 215 *Braun, W.* Entwicklung multichromatischer holographischer Interferometrie im 3 μ m Wellenlängenbereich (HF-Laser) und Anwendung auf Hoch-Beta-Stellarator-Plasmen.
TU München (1974)
- 216 *Borrass, K.* Neoklassische Diffusion in einem Axialsymmetrischen vollionisierten Plasma bei mittleren und hohen Stoßfrequenzen
Universität München (1974)

- 217 *Hellermann, M. v.* Thomson-Streuung an Plasmen niedriger Elektronendichte und -temperatur mit Hilfe eines kontinuierlichen Argon-Ionen Lasers
Universität München (1974)
- 218 *Kerner, W.* MHD Instabilitäten in Tokamak Gleichgewichten
Universität München (1974)
- 219 *Kirschner, J.* Disappearance Potential Spectroscopy und verwandte Methoden angewandt auf saubere und oxidierte Vanadium-Oberflächen
TU München (1974)
- 220 *Krause, H.* Gleichgewichts- und Stabilitätsuntersuchungen am Belt-Pinch
TU München (1974)
- 221 *Oetjen, G. H.* Aufbau und Erprobung eines mehrfach fokussierenden Flugzeitmassenspektrometers
TU München (1974)
- 222 *Roth, J.* Über die Bildung und das Aufbrechen von Gasblasen in Niob bei Beschuß mit 0,5 bis 9 keV Helium Ionen
TU München (1974)
- 223 *Söll, M.* Kritische Ströme stark gestörter Filamentleiter
TU München (1974)

Nachtrag

zur Liste „Veröffentlichungen und Konferenzberichte“

- 224 *Bünde, R.* Designing MHD Generator Systems for Minimum Power Production Costs
Raeder, J. Energy Conc. 13, 143 (1973) — erst im Februar 1974 erschienen
- 225 *Flakus F. N.* Fusion Power and the Environment
Dänner, W. IAEA-Report, 3rd draft (1974)
- 226 *Lengyel, L. L.* A two-dimensional code for laser pellet heating and compression calculations
7th European Conference on Plasma Production by High Power Lasers, Garching (1974)
- 227 *Leuterer, F.* Plasma Capacitor with Ion Acoustic Waves Zeitschr. f. Naturforsch. 29a, 851 (1974)
- 228 *Wedler, H.* Switching Problems in Crowbar and Power Crowbar Systems
Klement, G. International Conference on Energy Storage, Compression and Switching, Torino (1974)

LABORBERICHTE

- IPP 1/139 *Fünfer, E., Gruber, J., Kaufmann, M., Köppendörfer, W., Neuhauser, J.:* Wall-Stabilized High-Beta Stellarator (Proposal).
- IPP 1/140 *Becker, G.:* Analytic Study of MHD Equilibria of the Belt Pinch in "Belt Pinch Coordinates."
- IPP 1/141 *Söldner, F.:* Untersuchung der schnellen magnetischen Plasma-Kompression als Methode zur Erzeugung hoher Temperaturen bei schwacher Kompression.
- IPP 1/142 *Dum, C. T., Chodura, R., Biskamp, D.:* Turbulent Heating and Quenching of Ion Sound Instability.
- IPP 1/143 *Becker, G., Wunderlich, R.:* Neutron Flux Distribution on the Wall of Toroidal Controlled Thermonuclear Reactor Devices with Elongated Cross-Section.

- IPP 1/144 *Becker, G.:* Axial Contraction in Toroidal Pinches with Non-circular Plasma Cross-Sections.
- IPP 1/145 *Batemann, G., Schneider, W., Grossmann, W.:* Ideal MHD Instabilities as an Initial Boundary-Value Problem.
- IPP 1/146 *Braun, W.:* Entwicklung multichromatischer holographischer Interferometrie im 3 um Wellenlängenbereich (HF-Laser) und Anwendung auf Hoch-Beta-Stellaratorplasmen.
- IPP 1/147 *Biskamp, D., Chodura, R., Dum, C. T.:* Ion Sound Spectrum and Electron-Wave Interaction in Perpendicular Shock.
- IPP 1/148 *Bergmann, R.:* Bestimmung der Neutralteilchendichte eines Deuteriumplasmas mit Hilfe optischer Absorptionsmessungen im Vakuum UV.
- IPP 1/149 *Correa, D.:* On the Stability of High- β , Helically Symmetric Hydromagnetic Equilibria with Decreasing Pressure Profile.
- IPP 1/150 *Krause, H.:* Equilibrium and Stability Investigations in the Belt Pinch.
- IPP 1/151 *Chodura, R.:* A Hybrid Fluid-Particle Model for the Description of Ion Heating in High-Mach-Number Shock Waves.
- IPP 2/217 *Rehker, S., E. Speth:* Rate Coefficient for Interaction of Monoenergetic Particle Beams with Maxwellian Plasmas.
- IPP 2/218 *Rehker S., H. Wobig:* The effect of Perturbations on the Magnetic Field of the W VII-Stellarator.
- IPP 2/219 *Rehker, S., D. Zimmermann:* "RESI" A First Stage of an Online Data Acquisition and Analysis System for Low- β Experiments. (IPP 4/115)
- IPP 2/220 *Gibson, A., J. J. Bickerton, H. C. Cole, M. Haegi, J. Hugill, J. W. M. Paul, P. Reynolds, J. Sheffield, E. Speth, P. E. Stott:* The Cleo-Tokamak Experiment. Culham, CLM-R 122.
- IPP 2/221 *Barberio-Corsetti, P.:* Free-Boundary Helical Equilibria Part I: Sharp Boundary.
- IPP 2/222 *Barberio-Corsetti, P.:* Elongated Free-Boundary Axisymmetric Equilibria.
- IPP 2/223 *Elsner, A.:* Cooling Systems of the W VII Stellarator.
- IPP 2/224 *W VII-Team:* Stellarator Wendelstein VII, Information Presented at the 8th Symp. on Fusion Technology, the Netherlands.
- IPP 2/225 *Cattanei, G., R. Croci:* Collisionless Plasma Heating at the Ion Cyclotron Frequency in a Toroidal Device.
- IPP 2/226 *Pacher, H. D.:* Wega Parameter Calculations in Equilibrium.

- IPP 2/227 *Baker, K.:* Computing the Electron Density Profile from Microwave Interferometer Measurements.
- IPP 2/228 *Cordey, J. G., E. P. Gorbunov, J. Hugill, J. W. M. Paul, J. Sheffield, E. Speth, P. E. Stott, V. I. Tereshin:* Neutral Injection Heating of a Tokamak Plasma-Theory and Experiment, CLM-P 407, Culham Laboratory, Abingdon, Oxfordshire (1974).
- IPP III/11 *Gernhardt, J., G. Herppich, F. Werner:* The Magnetic Iron-Core Model and Stray Field Measurements for Pulsator I and their Relevance to JET.
- IPP III/12 *Wulff, H.:* Über die Energieverteilung von Elektronen in einem Protonen-Elektronen-Plasma mit Dichten größer als die Festkörper.
- IPP III/13 *Klüber, O., H. Wulff:* Eine gemeinsame statische Abzählung gebundener und freier Elektronenzustände.
- IPP III/14 *Klüber, O.:* Investigations of the Equilibrium and Stability Behaviour of Tokamak Discharges in Pulsator I. IPP III/14.
- IPP III/15 *Gernhardt, J., D. Groening:* Messung von sehr hohen Gleichströmen mit aktiven Integratoren.
- IPP IV/63 *Ariga, S., H. Brändlein, P. Sachsenmaier:* Applicability of some photo detectors to iodine laser pulses ($\lambda = 1.3 \mu$).
- IPP IV/64 *Leuterer, F.:* Plasma Capacitor with Ion Acoustic Waves.
- IPP IV/66 *Tutter, M., S. Puri:* On the Possibility of the Simulation of a Slow-Wave System by a Phased Array of Waveguides.
- IPP IV/67 *Fuß, W., K. Hohla:* Druckverbreiterung der Jodlaserlinie bei $1.3 \mu\text{m}$.
- IPP IV/69 *Proch, D., H. Pummer, J. Wanner:* Ein kontinuierlich arbeitender chemischer Fluorwasserstoff-Laser hoher Leistung.
- IPP IV/71 *Puri, S., M. Tutter:* Finite Temperature Effects on the Lower-Hybrid Dispersion Characteristics.
- IPP IV/72 *Mayer, H. M.:* Some Aspects of Plasma Diagnostics by Means of a Diamagnetic Coil.
- IPP IV/73 *Puri, S., M. Tutter:* Totality of Waves in a Vlasov Plasma.
- IPP IV/74 *Brederlow, G., K. Hohla, K. J. Witte:* Pulsed High Power Iodine Laser at IPP.
- IPP IV/75 *Schmailzl, U.:* Schwingungsrotations-Energieverteilung und Relaxationsprozesse im HF-Laser.
- IPP IV/76 *Puri, S.:* Absorption of the Lower-Hybrid Wave in a Thermonuclear Plasma.

- IPP IV/77 *Derfler, H.:* Excitation of Plasma Waves by Gaps and Slow-Wave Structures.
- IPP IV/78 *Puri, S., Tutter, M.:* Grazing Incidence Coupling to the Lower-Hybrid Resonance.
- IPP 9/15 *Oetjen, G. H., W. Poschenrieder:* Aufbau und Erprobung eines mehrfachfokussierenden Flugzeitmassenspektrometers.
- IPP 9/16 *Eckstein, W., H. G. Schäßler, H. Verbeek:* Steuerung von Edelgasionen an Metalloberflächen.
- IPP 9/17 *Roth, J.:* Über die Bildung und das Aufbrechen von Gasblasen in Niob bei Beschuß mit 0,5 bis 9 keV Helium Ionen.
- IPP 4/112 *Dänner, W.:* "Tritium Economy and Tritium Safety of Fusion Power Plants".
- IPP 4/118 *Klement, G., Wedler, H.:* „Elektrisch getriggerte Funkenstrecken in Stoßstromanlagen“.
- IPP 4/119 *Dänner, W.:* "The MHD Pressure Losses as a Possible Criterion for the Selection of Structure Materials for Fusion Reactor Blankets".
- IPP 4/120 *Amenda, W., Kullmann, D., Krüger, P., Pillsticker M.:* „Erste Inbetriebnahme des Siemens SL-Prototyp-Magneten W VII im IPP“.
- IPP 4/121 *Baumhacker, H., Brinkschulte, H., Fill, E., Lang, R. S.:* „TEA-CO₂-Oszillatoren zur Erzeugung von 1 ns-Pulsen im Einlinien-, Mehrlinien- und Zweibandbetrieb“.
- IPP 4/122 *Dänner, W.:* "SYSTEMS – A Program for Evaluating the Main Physical and Technological Parameters of Fusion Reactors".
- IPP 4/125 *Büchl, H., Haering, T.:* "Interferometric Density Measurements by a CO₂-Laser at a Laser Produced Plasma".
- IPP 4/126 *Kaspar, G.:* „Konstruktion von Gas-Schwebelagern (Gas-Radiallagern und Gas-Axiallagern)“.
- IPP V I/1 *Bünde, R., Dänner, W., Hofer, W., Hüls, M., Pöhlchen, R., Söll, M., Taglauer, E., Weichselgartner, E. R.:* „Aspekte der Energieversorgung mit Fusionsreaktoren“.

Die Hochschulförderung des IPP

Das Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart

(Prof. Dr. Hartmut Zwicker)

Die Arbeiten im IPF waren im Berichtsjahre in der wesentlichen Thematik auf die Zusammenarbeit mit dem IPP ausgerichtet.

Im Bereich Wellen und Plasmaheizung standen experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Einfluß von Plasmahomogenitäten auf die Ausbreitung von Alfvénwellen und deren nichtlineares Verhalten im Vordergrund.

Im linearen Fall konnten Reflexionen und stehende Wellen nachgewiesen und theoretisch gedeutet werden.

Im nichtlinearen Fall ergab sich starke Dämpfung, die durch turbulente Effekte bewirkt wird und damit eine wirksame Heizung auch für stoßfreie Plasmen darstellt.

Für Mikrowellen konnte für den nichtresonanten Fall der Absorptionsvorgang in der vorliegenden Spiegelanordnung geklärt werden.

Im Bereich Laseranwendungen wurde die Methode der stationären Streuung an einem stabilisierten Wasserstoffbogen erfolgreich getestet. Neben der Thomson-Streuung konnte hier durch Rayleigh-Streuung die Temperatur der angeregten H-Atome gemessen werden. Im Rahmen dieser Experimente wurde weiter die Anregung von Plasmaschwingungen durch den Laser ermittelt und durch Messungen an verbotenen He-Linien getestet.

Erste Streumessungen mit homodynem Nachweis an einem Lichtbogen als Testplasma konnten bei 10,6 μ durchgeführt werden, nachdem der erforderliche single-mode-Laser entwickelt war.

Im Rahmen der FIR Diagnostik wurden mit einem HCN-Laser Strahlableitmessungen an Bogen-Plasmen durchgeführt, die Grenzen des Verfahrens theoretisch ermittelt und eine Methode zur Aufnahme zweidimensionaler Interferogramme im FIR entwickelt.

Bei der Kurzzeittechnik konzentrierten sich die Untersuchungen einerseits auf die Entwicklung eines Stickstofflasers kurzer Pulsdauer, wie er für einen geplanten Lichtverstärker auf der Basis optisch gepumpter Farbstoffe erforderlich ist. Hier konnten unter Benutzung optischer Laufzeiteffekte Pulsdauern von 450 psec bei Leistungen von 1 MW erreicht werden.

Zur Untersuchung kurzer optischer Einzelimpulse wurde weiter ein neues Samplingverfahren entwickelt, das die Vermessung von Einzelimpulsen bis herab zu Pulsauern von 50 psec erlaubt.

Im Bereich dichter Plasmen, die im IPF Stuttgart mit Hilfe des Plasma-Fokus erzeugt werden, stand die Untersuchung des zeitlichen Verhaltens im Vordergrund. Hier konnten durch interferometrische Methoden die Instabilitäten wäh-

rend der dichten Phase mit hinreichender Zeitauflösung (500 psec) untersucht und erstmals die Röntgenemission orts- und zeitaufgelöst erfaßt werden. Für die Wechselwirkung optischer Strahlung mit dem Fokus wurde der erforderliche Laser entwickelt.

Zur Deutung der Neutronenemission wurden Teilchenrechnungen zur Fokusphase durchgeführt, deren Resultate das beam-beam Modell für die Neutronenproduktion wahrscheinlich machen.

Außerdem wurden experimentelle und theoretische Arbeiten zur optimalen Parameterwahl von Fokusanordnungen im Hinblick auf die Neutronenemission (Hochvoltfokus) durchgeführt.

Erste Untersuchungen befaßten sich ferner mit der Wechselwirkung des Fokusplasmas mit einem Festkörper, der in Form eines CD₂-Fadens in der Fokusachse aufgespannt war und in dem sich während der Fokusphase der Strom konzentriert.

1. WELLEN UND PLASMAHEIZUNG

(E. Räu chle, E. Berger, U. Erz, G. Janzen ¹⁾,
F. Moser, G. Müller, P. G. Schüller, K. Schwörer, W. Staib)

Die experimentellen und theoretischen Arbeiten des Instituts für Plasmaforschung der Universität Stuttgart befaßten sich vorwiegend mit der Ausbreitung und Dämpfung von Wellen in inhomogenen Plasmen und dem nichtlinearen Verhalten von Alfvénwellen. Diese Untersuchungen sind von allgemeinem Interesse, da reale Plasmen meist inhomogen sind. Bei den behandelten Fällen sind die Wellenlängen jeweils von der Größe der Plasmainhomogenität („Wellenoptik“).

Bei Experimenten zur Plasmaerzeugung wurde die Absorption von Mikrowellen eingehend studiert.

1.1 Ausbreitung und Reflexion von Alfvénwellen

Im zylindrischen Plasma einer Bogenentladung (Plasmaus I) $n_e = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $T_e \approx 3 \text{ eV}$ mit überlagerten axialsymmetrischen inhomogenen Magnetfeldern wurde die Ausbreitung von Torsions-Alfvénwellen untersucht. Die azimutale Komponente des magnetischen Wellenimpulses wurde durch Magnetsonden axial und radial gemessen und numerisch nach Phase und Amplitude fourierzerlegt. Neben dem Fall eines homogenen Magnetfeldes wurden drei verschiedene Typen räumlich inhomogener Felder untersucht, nämlich a) axial abnehmendes, b) axial ansteigendes und c) axial periodisch moduliertes Magnetfeld. In den genannten Fällen weicht das Wellenfeld infolge von Teilreflexion an den Feldinhomogenitäten sowohl in der Phase als auch in der Amplitude von der Wellenform $J_1(\alpha \cdot r) \cdot e^{ik \cdot Z} \cdot e^{-\gamma \cdot Z}$ des homogenen Falles ab. Die Überlagerung von hinlaufender und reflektierter Welle führt zu einer Amplitudenerhöhung oder -erniedrigung im vorangehenden homogenen Magnetfeldbereich, da die Reflexion je nach Wellenlänge und Typ der Feldinhomogenität gleichphasig oder gegenphasig erfolgt. Dies ist in Abb. 1 am Beispiel der Wellenausbreitung in einem axial ansteigenden Magnetfeld dargestellt. Die bei der theoretischen Behandlung auftretende Differentialgleichung wurde für die Ausbreitung von Alfvénwellen im axial und radial inhomogenen Magnetfeld numerisch gelöst. Die Ergebnisse

sind in Abb. 1 eingetragen. Im räumlich periodisch modulierten Magnetfeld treten starke Amplitudenerhöhungen auf, besonders dann, wenn die Wellenlänge doppelt so groß ist wie die Modulationslänge des überlagerten Magnetfeldes (räumliche parameterische Resonanz), im dargestellten Beispiel bei der Frequenz $\omega = 2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$. (Abb. 2)

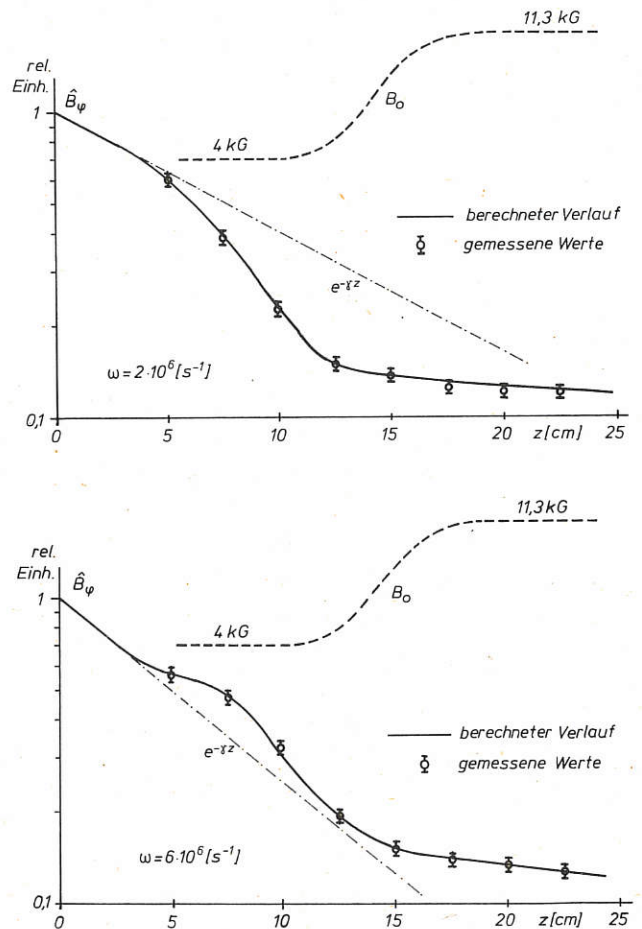


Abb. 1: Verlauf der Wellenamplitude \hat{B}_φ in einem axial ansteigenden Magnetfeld.

¹⁾ Zu einem Forschungsjahr in Sydney (Australien) an der dortigen Universität.

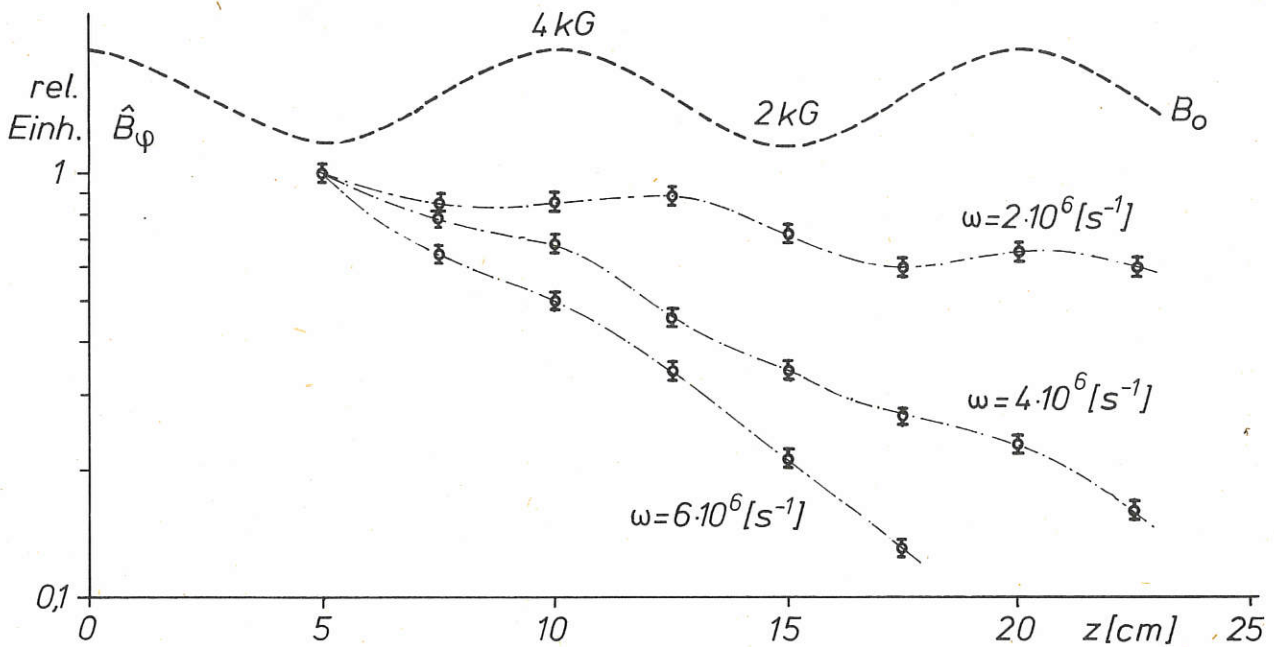


Abb. 2: Gemessener axialer Verlauf der Wellenamplitude B in einem räumlich periodisch modulierten Magnetfeld.

Für bestimmte Typen plasmamagnetischer Wellen treten in inhomogenen Plasmen Singularitäten in den Differentialgleichungen auf, die das Ausbreitungsverhalten beschreiben. Dies führt zu Resonanzerscheinungen mit einer Erhöhung der Wellenamplitude und einer Absorption der Wellen an den singulären Stellen. Da dies für die Aufheizung inhomogener Plasmen mit endlichem β von Bedeutung sein kann, wurden theoretische Untersuchungen hierzu in Angriff genommen. Dabei steht die Frage der Aufteilung der absorbierten Energie in die einzelnen Energieanteile im Vordergrund.

1.2 Nichtlineare Torsions-Alfvénwellen

Im Experiment Plasmaus II wird das Ausbreitungsverhalten stark nichtlinearer Torsions-Alfvénwellen und der damit verbundenen Aufheizvorgänge untersucht. Der experimentelle Aufbau ist analog zum Experiment Plasmaus I. Die Wellenanregung erfolgt im Frequenzbereich um 600 kHz mit Wellenamplituden bis zu 5 kG, wobei das Grundmagnetfeld maximal 9 kG beträgt.

Schon bei relativ kleinen Amplituden treten nichtlineare Erscheinungen auf; so steilen sich z. B. die Wellenfronten auf. Gleichzeitig treten Harmonische der Grundfrequenz auf. Die Amplitude der ersten Harmonischen hängt quadratisch von der Amplitude der ursprünglichen Welle ab, wie experimentell gezeigt wurde. Im Rahmen einer Störungsrechnung wurde dieser Fall auch theoretisch behandelt.

Die Untersuchung der Dämpfung der Welle in Abhängigkeit von der Amplitude zeigt, daß die Dämpfungslänge d mit wachsender Amplitude zunimmt. Bei weiterer Amplitudenvergrößerung nimmt sie wieder stark ab (Abb. 3). Die zunächst beobachtete Zunahme der Dämpfungslänge wird durch die Aufheizung der Elektronen und die damit verbundene Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit bewirkt. Bei weiterer Erhöhung der Wellenamplituden werden die Driftgeschwindigkeiten der den Wellenstrom tragenden Elektro-

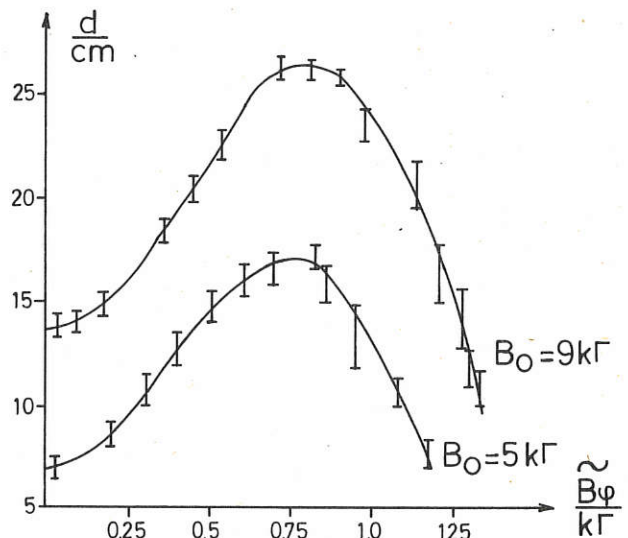


Abb. 3: Abhängigkeit der Dämpfungslänge d von der Wellenamplitude.

nen so groß, daß stromgetriebene Instabilitäten auftreten, die eine Verringerung der Leitfähigkeit und somit erhöhte Dissipation bewirken.

1.3 Plasmaerzeugung durch Mikrowellen

Ziel der Untersuchungen war die Erzeugung eines Wasserstoffplasmas mit Hilfe von Mikrowellen zur Füllung einer magnetischen Spiegelanordnung (ELIZA, $B_0 = 4 \text{ kG}$, $l = 1,5 \text{ m}$, Spiegelverhältnis 1,7). Bei Verwendung einer helischen Schlitzantenne (Lisitano-Spule) konnte bei Einstrahlung von 2,5 kW für 10 ms bei 2,45 GHz und bei einem Fülldruck von $5 \cdot 10^{-4}$ Torr ein nahezu homogenes Wasserstoff-

plasma von 8 cm Durchmesser und mittlerer Elektronendichte von 10^{12} cm^{-3} erreicht werden.

Die Vorionisation mit Hilfe der Lisitano-Antenne selbst wurde eingehend untersucht. Da die Energieabsorption bei den erreichten Plasmaparametern bei Frequenzen unterhalb sowohl der Elektronenzyklotronfrequenz als auch der Plasmafrequenz stattfindet, kommt dafür anomale Absorption von Wellen in Frage. Die Erzeugung des primären Plasmas kann bei kleinen Neutralgasdrücken nur durch Absorption bei der Elektronenzyklotronfrequenz (ECR) selbst erfolgen. Bei der vorhandenen Spiegelanordnung existieren Bereiche lokaler ECR außerhalb der magnetischen Spiegel. Dort konnte auch das Entstehen des Vorplasmas nachgewiesen werden. Bei Abdeckung dieser Zonen konnte eine Zündung nur noch dann erreicht werden, wenn das Magnetfeld in der Nähe der Lisitanoantenne für ca. 200 μs auf das ECR-Feld heruntergepulst wurde. Diese zweite Methode der Vorzündung durch zeitlich lokale ECR eignet sich speziell für toroidale Experimente. Nach dem Zünden des Plasmas wurde die absorbierte Leistung als Funktion der angelegten HF-Feldstärke analysiert. Dabei zeigten sich Bereiche der Sättigung, die durch turbulente Prozesse erklärt werden können. Zerfallsprodukte der primären Welle wurden bei Einsetzen dieser Turbulenzen experimentell nachgewiesen. Eine weitere Steigerung der HF-Feldstärke brachte keine Erhöhung der absorbierten Leistung.

1.4 Plasmasimulation

Um anomale Effekte bei der Ausbreitung von Wellen im Plasma zu erfassen, wurden numerische Rechnungen nach der PIC-Methode in Angriff genommen. Auf diese Weise können starke Nichtlinearitäten und die Wellenausbreitung in inhomogenen Plasmen behandelt werden. Für das numerische Verfahren wurde die 2-dimensionale Poisson-Gleichung nach Hockney (Fourier cyclic reduction) sowie nach der Buneman-Methode (revised cyclic reduction) behandelt und auf verschiedene Randbedingungen erweitert. Erste Anwendungen betrafen die Zweistrominstabilität und die Landau-Dämpfung.

2. LASERANWENDUNGEN

(H. F. Döbele, R. Behn, G. Dodel, A. Gondhalekar, H. Hailer, K. Hirsch, E. Holzhauser, J. Krautter, W. Kunz, K. Tichmann)

In diesem Rahmen werden vorzugsweise diagnostische Verfahren entwickelt, wie sie für künftige Experimente der fusionsbezogenen Plasmaphysik wegen der zu erwartenden Erweiterung im Hinblick auf Zustandsgrößen, Zeitskalen und geometrische Dimensionen erforderlich sind.

2.1 Stationäre Streuung im Sichtbaren

Hier liegt der Schwerpunkt bei der Erarbeitung von Diagnostikverfahren, die es in der Endversion gestatten sollen, Temperatur- und Dichtemessungen an Plasmen im Bereich $n_e \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ bei Betriebsdauern von einigen hundert ms mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen ms durchzuführen. Als erster Schritt wurden Messungen an einem magnetfeldstabilisierten Wasserstoffbogen ($n_e \approx 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = 1-2 \text{ eV}$) mit einem Argonionenlaser ($\lambda = 5145 \text{ \AA}$) durchgeführt. Jeder Punkt des Streuprofiles ($\Theta = 90^\circ$, $\alpha = 0,3$) wurde aus 10 Messungen mit einer Integrationszeit von 30 s gewonnen (Lock-In-Verstärker zur Unterdrückung des Ei-

genleuchtens). Die Temperatur läßt sich auf 10% genau bestimmen.

Angeregt durch frühere Messungen von Röhr am IPP wurde versucht, die enge spektrale Nachbarschaft der zweitstärksten Ar^+ -Laserlinie (4880 \AA) zu $\text{H}\beta$ (4861 \AA) auszunutzen, um durch quasiresonante Streuung Informationen über die Temperatur angeregter H-Atome zu erhalten.

Die Messung erwies sich trotz vergleichbarer Gesamtintensitäten von quasiresonanter Streuung und Thomsonstreuung als gut durchführbar, weil der quasiresonante Anteil als schmale Überhöhung auf dem breiteren Elektronen-Thomsonprofil auftritt.

Abb. 4 zeigt das mit einem Fabry-Perot-Interferometer ($\Delta\lambda_F = 6 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda_A = 0,35 \text{ \AA}$) gewonnene Streuprofil, dessen Breite von 0,75 \AA im Verhältnis zur Breite des Elektronenprofils ($\approx 30 \text{ \AA}$) gut die erwartete Temperaturgleichheit zwischen Elektronen und schweren Teilchen wiedergibt.

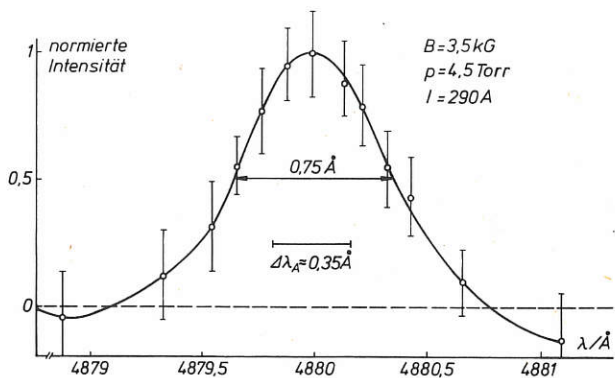


Abb. 4: Streuprofil bei $\lambda = 4880 \text{ \AA}$, gemessen mit Fabry-Perot-Interferometer.

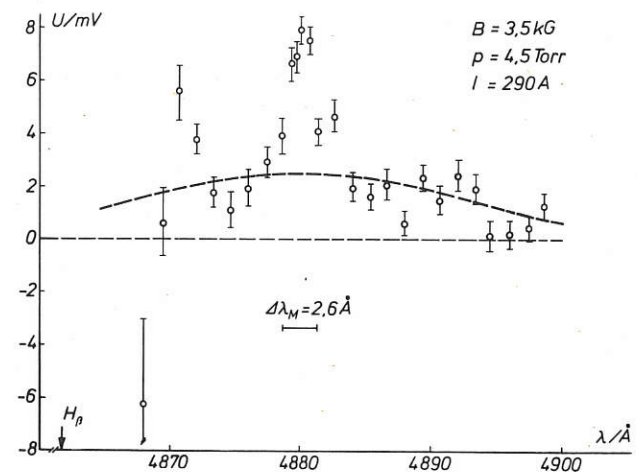


Abb. 5: Streuprofil bei $\lambda = 4880 \text{ \AA}$, gemessen mit Monochromator.

Abb. 5 zeigt eine gröbere spektrale Auflösung ohne Fabry-Perot-Interferometer, dafür über einen größeren spektralen Ausschnitt. Überraschend ist der negative Meßwert im Kurzwelligen, gefolgt von einer längerwelligen Überhöhung. Der negative Meßwert beweist eine Abnahme des Plasma-Eigenleuchtens an dieser Stelle immer dann, wenn der Laser einstrahlt, und damit eine meßbare Wech-

selwirkung des Lasers mit dem Plasma. Dieser Effekt hängt offensichtlich mit einer an dieser Stelle liegenden Thoriumlinie (thorisiertes Wolfram als Elektrodenmaterial) zusammen, die synchron mit der Modulation des Lasers zu längeren Wellenlängen hin verschoben wird.

Die Deutung über den quadratischen Starkeffekt durch laserinduzierte niederfrequente Felder wird gestützt durch vorläufige Messungen an Satelliten zu verbotenen Heliumlinien (4471 \AA), wenn He in kleiner Menge dem Brenngas Wasserstoff beigemischt wird. Eine Deutung der Erscheinung steht aus.

2.2 Stationäre Streuung bei $10,6 \mu$

Parallel zu den Messungen im Optischen werden analoge Messungen bei $10,6 \mu$ mit einem stabilisierten cw-Laser durchgeführt ($\theta = 90^\circ$, $\alpha \approx 4$). Der Laser ist mit einem Reflexionsgitter auf eine Rotationslinie fixiert; seine axiale

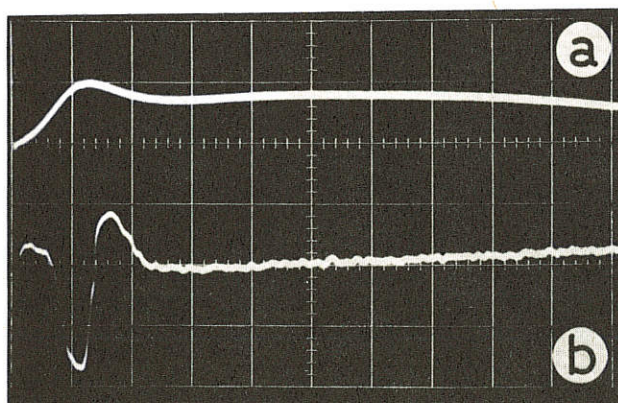


Abb. 6: Lokaloszillator (a) und Streusignal (b) ohne Plasma (200 ns/div.).

Mode wird piezoelektrisch stabilisiert. Mit einer nachgeschalteten Verstärkersektion werden etwa 50 W erreicht. Zum Nachweis der Streustrahlung wird ein auf 20 K gekühlter Ge-Hg-Kristall eingesetzt. Obwohl bereits Streusignale identifiziert werden konnten, scheiterte bisher die Reproduzierbarkeit der Meßmethode über längere Zeiträume an starken Schwankungen im Rauschverhalten des Detektors.

2.3 Gepulste Laserdiagnostik bei $10,6 \mu$ mit Lichtmischung

Hier liegt der Schwerpunkt auf der Erarbeitung von Methoden, die es gestatten sollen, ein thermisches Streuspektrum für $\alpha \gg 1$ an fusionsrelevanten Plasmen zu messen, um so die Iontemperatur zu erhalten.

Nach der Entwicklung eines Hybrid- CO_2 -Lasers (in Zusammenarbeit mit H. Heckenberg vom IPP), der die erforderliche spektrale Reinheit besitzt, wurde das Verfahren an einem magnetfeldstabilisierten Wasserstoffbogen erprobt. Erste Messungen wurden in Kathodennähe durchgeführt, um die dort auftretenden starken Streusignale zu untersuchen. Die obere Spur in Abb. 6 und 7 zeigt jeweils den zeitlichen Verlauf des Lokaloszillators, welcher dem Laser Ausgangsimpuls entspricht. Die untere Spur in Abb. 6 zeigt das gefilterte und verstärkte Detektorsignal ohne Plasma (Ge-Hg-Detektor bei 20 K). Zu Beginn ist der Einschwingvorgang des vorgeschalteten Hochpaßfilters zu erkennen. Die untere Spur in Abb. 7 ist bei eingeschaltetem Bogen

aufgenommen. Der schmale Spektralbereich, in welchem die Streustrahlung auftritt, zeigt, daß es sich nicht um ein thermisches Spektrum handelt. Verschiedene Umstände (Nähe der Kathode, unvollständige Ionisation, Stoßbestimmtheit, makroskopische Strömung, Gradienten) erschweren die Interpretation der Signale.

2.4 Diagnostik im Fernen Infrarot (FIR)

Diagnostikverfahren in diesem Spektralbereich sind besonders wichtig für Plasmen niedriger Dichte ($n_e \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) bei Abmessungen $\geq 10 \text{ cm}$. Um hier einen ersten Eingang zu gewinnen, wurde zunächst die in der sichtbaren Optik gebräuchliche Technik der Schlierenverfahren ins FIR übertragen. Am Beispiel der Randzone eines Hochstromkohlebogens wurde gezeigt, daß Schlierenexperimente im FIR experimentell möglich sind (Abb. 8) und unter gewissen Bedingungen vorteilhaft zur Elektronendichtebestimmung ein-

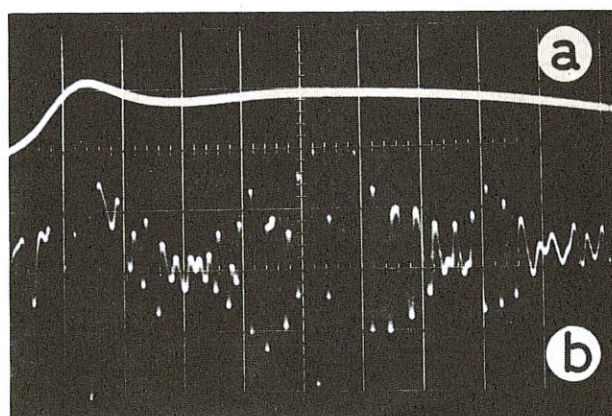


Abb. 7: Lokaloszillator (a) und Streusignal (b) mit Plasma (200 ns/div.).

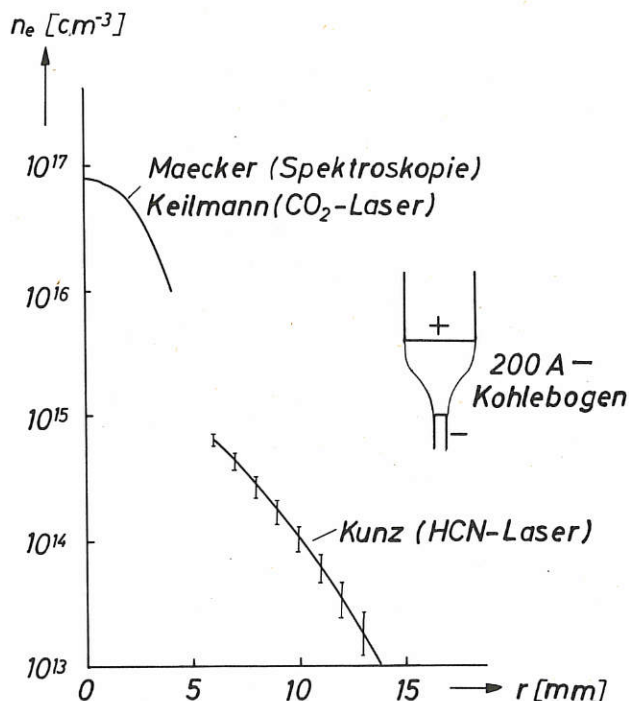


Abb. 8: Elektronendichteprofil des Hochstromkohlebogens.

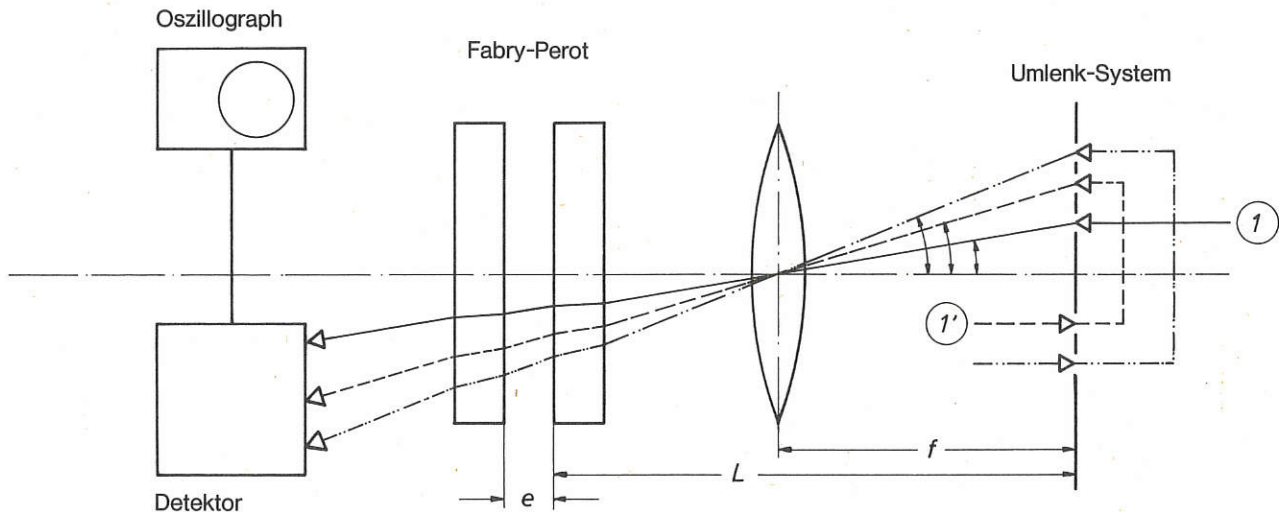


Abb. 9: Fabry-Perot-Interferometer mit optimaler Lichtausnutzung.

gesetzt werden können. Diese Bedingungen lassen sich in folgenden Anwendungskriterien zusammenfassen:

- a) Notwendig für eine erfolgreiche Anwendung der Schlierenverfahren ist:

$$\frac{dn_e}{dx} \gg \frac{2.22 \cdot 10^{13}}{G \cdot L \cdot \lambda}$$

G = Plasmaausdehnung in Strahlablenkrichtung in cm

L = Plasmaausdehnung in Strahlrichtung in cm

λ = Wellenlänge in cm

$$\frac{dn_e}{dx} = \text{typischer Elektronendichtegradient in cm}^{-4}$$

- b) Hinreichend dafür, daß der Ablenkwinkel als Funktion des Ablenkortes gemessen werden kann, ist:

$$4,7 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{G} \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot \lambda}} \ll \left| \frac{d^2 n_e}{dx^2} \right| \ll \left| \frac{dn_e}{dx} \right| \cdot \frac{\sqrt{L \cdot \lambda}}{4,7 \cdot 10^6}$$

Der wellenoptische Aspekt des Schlierenverfahrens wird bei der Anwendung im FIR besonders deutlich. Es wurden deshalb Fourieroptische Überlegungen durchgeführt, die allgemeine Aussagen über die prinzipielle Meßgenauigkeit bei Schlierenverfahren erlauben. Versuche zur zweidimensionalen Interferometrie in diesem Wellenlängenbereich sind im Gange. Die Methode der Evaporographie zur Bildaufzeichnung hat gute Anfangsergebnisse geliefert; so reichten $10^{-1} \text{ mJ/cm}^{-2}$ aus, um einen Farbumschlag zu erzielen.

2.5 Plasmageschwindigkeiten aus dopplerverschobenen Spektrallinien

Ein neues Verfahren zur Messung von Linienverschiebungen, die klein gegen die Linienbreite sind, wurde erprobt. Es beruht – ähnlich dem bekannten Solarmagnetographen von *Babcock* – auf Umsetzung der spektralen Verschiebung in eine Intensitätsänderung. Jedoch wird hier ein *Fabry-Perot*-Spektrometer eingesetzt, das einen kompakten Aufbau des Experiments gestattet und vor allem infolge der hohen Lichtstärke große Signal-Rausch-Verhältnisse ermöglicht. Das Verfahren wurde an einem Plasmastrahl erprobt. Die Ergebnisse stimmen mit vergleichbaren Ergebnissen von *Ahlborn* überein. Die untere Nachweisgrenze für Verschiebungen einer ungefähr 1 \AA breiten Spektrallinie beträgt 1 m \AA .

2.6 Mehrkanalige Fabry-Perot-Spektroskopie mit optimaler Lichtausnutzung

Mehrkanalige *Fabry-Perot*-Spektrometer herkömmlicher Art benötigen für jeden spektralen Kanal einen zugehörigen strahlenden Flächenausschnitt in der Objektebene. Bei vorgegebener Gesamtphotonenzahl bedeutet jede zusätzliche Ringzone eine Verringerung der pro Kanal nutzbaren Photonen. Für kurze Impulse läßt sich dieser Nachteil ausschalten. Das Prinzip ist in Abb. 9 dargestellt.

Durch eine kreisförmige Blendenöffnung bei ① tritt das Licht in das System ein. Für die nicht „passenden“ spektralen Anteile wirkt das *Fabry-Perot* wie ein Spiegel; sie werden also nach ① reflektiert. Wird das Licht an dieser Stelle erfaßt und dem *Fabry-Perot* unter verändertem Winkel erneut angeboten, so kann das Spektrum mit einem einzigen Detektor schrittweise „abgefragt“ werden, wenn die Impulsdauer $\gamma < \frac{2 \cdot L}{c}$ ist.

Für das Umlenkssystem erwiesen sich 90° -Miniprismen als am besten geeignet. Damit wurde ein 5kanaliges Instrument aufgebaut.

Die gemessenen Spektren konnten zur Kontrolle direkt mit den Ergebnissen eines herkömmlichen 5kanaligen Prismenpolychromators verglichen werden. Dabei wurde gute Übereinstimmung erreicht.

Die Methode ist zum Einsatz für solche Vorgänge geeignet, bei denen kurzzeitig eine vorgegebene Photonenzahl aus einem kleinen strahlenden Volumen möglichst verlustfrei spektral untersucht werden soll (z. B. Ionenlinie bei *Thomson*-Streuung).

2.7 Stationäre Plasmaquelle

Hier strömt ein in einer Kaskadenbogen-Brennkammer erzeugtes Plasma durch eine Hohlanode in einen Niederdruckteil ein. Dort steht ein stationäres Plasma mit folgenden Daten zur Verfügung: Länge = 3 m, Radius = 0,5 bis 3 cm, abhängig vom Verhältnis der Magnetfeldstärken im Hochdruck- und Niederdruckteil, wo sich B zwischen 1 und 10 kG variieren läßt. ($n_e = 10^{11} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $T_e \approx 0,3 \text{ eV}$, $T_i \approx 2 \text{ eV}$). Dieses Plasma dient zur Simulation von Fusionsplasmen bezüglich der Dichte und der Erprobung von Diagnostikmethoden.

3. KURZZEITTECHNIK

(H. H. Maier, H. Salzmann, H. Strohwalde, L. P. Warich)

Hier steht die Entwicklung von Verfahren im Vordergrund, die z. B. für die Kurzzeitdiagnostik am Plasmafokus und bei Laseranwendungen erforderlich sind.

3.1 TEA-Stickstofflaser als Pumplichtquelle für Farbstoff-Lichtverstärker

Für den Stickstofflaser wurde eine modifizierte *Blumlein*-Anordnung aus segmentierten Bandleitern verwendet. Hiermit gelang es, in einem 50 cm langen Entladungskanal eine elektrische Quarentladung in reinem Stickstoff bei Atmosphärendruck so zu zünden, daß eine Inversionszone mit Lichtgeschwindigkeit im Kanal entlangläuft. Diese Wanderwellenanregung äußert sich dadurch, daß die Laseremission in der Laufrichtung der Wanderwelle typischerweise 200mal intensiver als in der entgegengesetzten Richtung ist. Die Laser-Impulsdauer wurde mit einer Schmierkamera zu 400 ps bei einer Spitzenleistung von etwa 1 MW bestimmt.

Um die Winkeldivergenz auf den beugungsbegrenzten Wert zu reduzieren, wurden zwei Entladungskanäle optisch in Reihe geschaltet und zeitlich synchronisiert. Dies resultierte in einem Wert der Leuchtdichte des Lasers von $5 \cdot 10^{14} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, einem um einen Faktor 1000 höheren Wert als bei bekannten Systemen. Damit entspricht die Strahldichte der von kommerziell erhältlichen Hochleistungs-Rubinlasersystemen. Arbeiten zur Erhöhung der Repetitionsrate von bisher 200 Hz auf über 1 kHz sind im Gange.

3.2 Einzelimpuls-Samplingsystem

Die Entwicklung eines Samplingsystems für einzelne Lichtimpulse wurde weitergeführt und zu einem vorläufigen Abschluß gebracht. Dieses Verfahren gestattet mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 80 ps die elektronische Abtastung jedes Impulses einer äquidistanten Impulskette mit einem Impulsabstand von ≥ 10 ns. Durch die Strahlspaltung und unterschiedliche Verzögerung der Einzellichtbündel wird aus dem zu vermessenden Einzelimpuls eine derartige Impulskette hergestellt. Auf diese Art läßt sich die Impulsform eines Einzelimpulses mit der angegebenen Auflösung von 80 ps bestimmen.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Samplingverfahren triggerter der zu messende Impuls einen Start-Stop-Oszillator, der die Erzeugung der benötigten Abtastimpulse steuert. Der einstellbare Impulsabstand der Oszillatorimpulse erlaubt in weiten Grenzen beliebige Auflösung des zeitlichen Verlaufs. Die zusätzlich optische Verzögerung zwischen Triggerimpuls und Meßimpulskette macht eine Wahl des abzutastenden Impulsbereichs möglich.

Das gesamte System wurde mit einer Lichtimpulskette aus einem modengekoppelten Argon-Ionenlaser getestet und seine einwandfreie Funktion nachgewiesen. Die Messung der Impulsform eines einzelnen Jodlaserimpulses ($1.315 \mu\text{m}$) wird vorbereitet.

4. DICHTE PLASMEN

(G. Decker, H. Fischer, H. Frey¹⁾, K. Hirano²⁾, A. Imam, H. J. Kaeppler, B. Nahrath, G. Proß, H. Rapp¹⁾, D. Ruffner, N. Ruhs, P. Schilling, H. Schmidt, M. Shakhatre, M. Trunk³⁾)

Dichte heiße Plasmen lassen sich auf einfache Weise im Plasmafokus erzeugen. Diese Plasmen sind sowohl wegen ihrer intensiven Neutronenstrahlung als auch als Modell-Plasmen von Interesse.

4.1 Optische Diagnostik des Plasmafokus

Mit Hilfe der optischen Diagnostik (Schlieren-, Schattenaufnahmen und Interferometrie) wird versucht, dem makroskopisch erkennbaren Ablauf (raumzeitlicher Dichteverlauf, Ausbildung von Instabilitäten) die beobachtete Neutronenemission und Röntgenemission zuzuordnen. Die Auswertung der Interferogramme (450 ps Belichtungszeit) ergibt bei NESSI (Plasmafokus mit 30 kJ, 16 kV bei 4 Torr) bei Verwendung einer Hohllektrode als Innenelektrode (Anode) maximale Dichten von $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ bei Halbwertsbreiten um 2 mm, woraus folgt, daß nur etwa 20% der ursprünglich in einem Zylinder mit dem Durchmesser der Innenelektrode (6,6 cm) enthaltenen Teilchen auf der Fokusachse komprimiert werden.

Der typische Ablauf der Kompressionsphase des Plasmafokus geht aus der Bildfolge der Abb. 10 a–f hervor. Die Zeitskala ist auf den Zeitpunkt des Beginns harter Röntgenemission ($t = 0$) bezogen. Man erkennt die Ausbildung von $m = 0$ Instabilitäten und den anschließenden Zerfall des komprimierten Plasmazyklinders. Ab dem Zeitpunkt maximaler Kompression beginnt sich in axialer Richtung vor der Stoßwelle in das ungestörte Gebiet hinein eine Welle mit einer Geschwindigkeit von bis zu 10^8 cm/s auszubreiten (Abb. 10 d–f). Diese „Ionisationswelle“ ist auf die Ionisierung des Füllgases durch schnelle Deuteronen (Energie 10 keV) zurückzuführen. Es erscheint wahrscheinlich, daß diese hier beobachteten schnellen Deuteronen für die Neutronenproduktion wesentlich sind.

4.2 Röntgenemission des Fokusplasmas

Mit Hilfe der Doppel-Loch-Kamera und eines gepulsten „Channelplate“ wurden orts- und zeitaufgelöste Aufnahmen im Spektralbereich der weichen Röntgenemission durchgeführt (Belichtungszeit 5 ns). Es zeigte sich, daß die beobachteten Strukturen mit gleichzeitig vorgenommenen Bildwandleraufnahmen im optischen Bereich etwa dekongsgleich waren.

Eine Temperaturbestimmung durch Anwendung verschiedener Absorptionsfolien war nicht möglich, da sich aus den Messungen ergibt, daß entweder kein Bremskontinuum oder keine Maxwellverteilung der Elektronen vorliegt.

4.3 Fluorwasserstoff-Laser zur Anwendung am Plasmafokus

Für Messungen an kurzlebigen, dichten Plasmen wurde ein Fluorwasserstofflaser ($\lambda \approx 2,9 \mu\text{m}$) mit variierbarer Pulsbreite von 9–25 ns entwickelt, der ohne optisches Impulsfor-

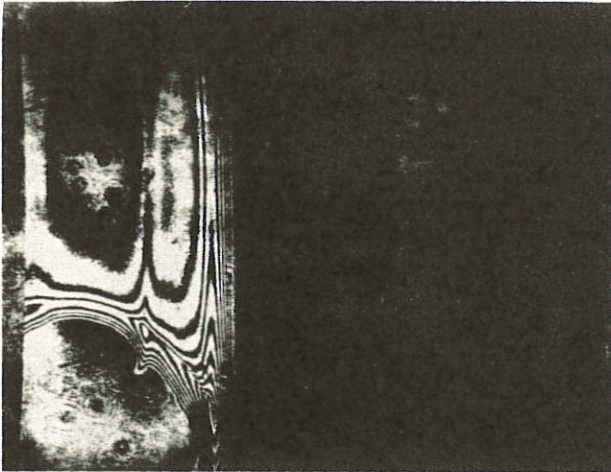
¹⁾ jetzt: IPP Garching

²⁾ Gast-Professor Gumma Universität, Japan

³⁾ z. Z. Forschungsjahr in Culham

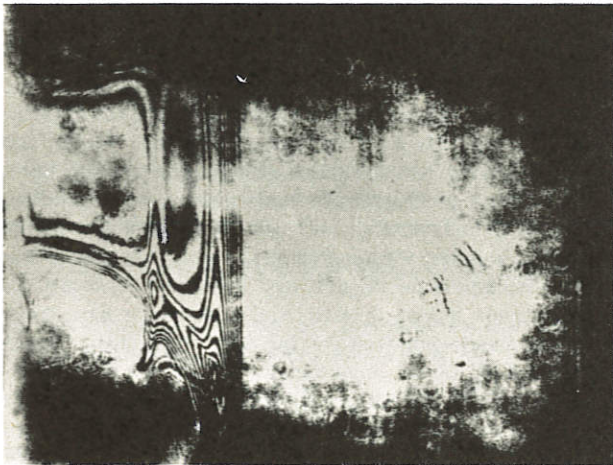
(Abb. 10: a–f nächste Seite!)

10a



3 cm

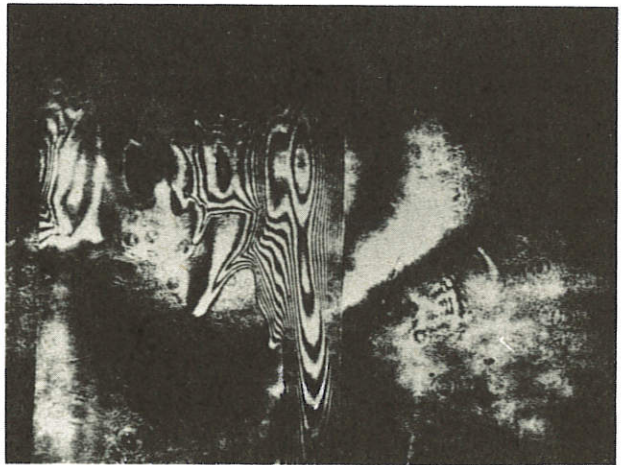
10b



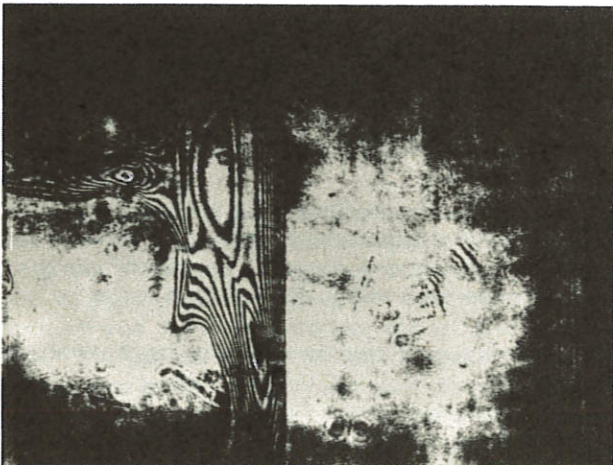
10d



10e



10c



10f

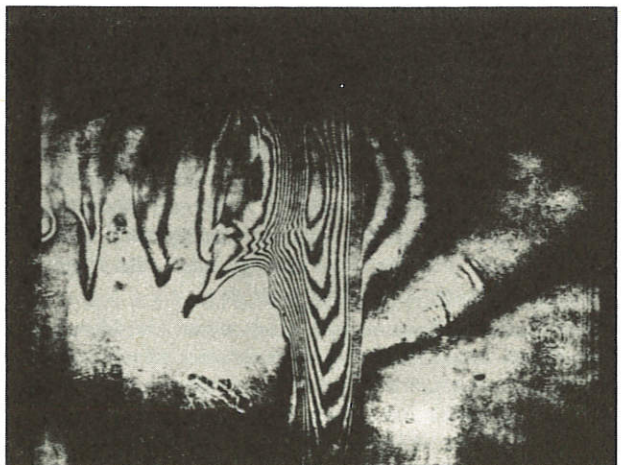


Abb. 10: Interferogramme der Kompression phase (a, b), der dichten Phase (c, d), und der anschließenden Phase der Auflösung (e, f) des Plasmafokus. Anode links, z-Achse waagrecht von links nach rechts. (Belichtungszeit: 450 ps; Plasmafokusdaten: 30 kJ, 16 kV, 4 Torr Deuterium, Hohlelektrode mit 6,6 cm Durchmesser)

mungssystem auskommt. Die Spitzenleistung der Pulse liegt bei 400 kW. In Kombination mit einem 1 m langen Verstärker wurden Spitzenleistungen von 13 MW und Energien bis 0.5 J erreicht. Mit diesem System wurde der zeitabhängige Verlauf der Leistungsverstärkung im Verstärker für verschiedene Gasmischungen untersucht. Das System wurde am Plasmafokus für erste schliereninterferometrische Messungen eingesetzt.

4.4 Optimierung von Plasmafokusmaschinen

Das Verhalten der Plasmafokuserladung hängt von zahlreichen experimentellen Parametern ab. Die Untersuchungen an der 12 kJ-Fokussmaschine MINIFOKUS hatten zum Ziel, Zusammenhänge zwischen den Optimierungskriterien Neutronenausbeute und Reproduzierbarkeit der Entladung einerseits und maßgebenden Maschinenparametern andererseits (z. B. Füllgasdruck, Länge der Innenelektrode, Struktur der Außenelektrode, Polarität der Kondensatorspannung) anzugeben. Die Ergebnisse fanden in einem Funktionsschema ihren Niederschlag.

Es ergaben sich experimentelle Hinweise für die Existenz eines optimalen Parameterbereichs, bei dem maximale Neutronenausbeute auftritt. Eine Hypothese wurde entwickelt, nach der es beim Überschreiten eines postulierten kritischen Wertes von j_A^2/p (j_A : Stromdichte an der Anode, p : Fülldruck) zu Fehlentladungen infolge der dann auftretenden radialen Kurzschlußspeichen kommt. Mit dieser Annahme konnte außerdem das Fehlverhalten der Entladung bei negativ gepolter Innenelektrode gedeutet werden.

4.5 Berechnung der Neutronenproduktion mittels einer Vielteilchenrechnung

Die Rechnung wurde in zwei Ortskoordinaten und drei Geschwindigkeitskomponenten für 10 000 Teilchen durchgeführt. Da die durch das elektrische Feld beschleunigten Teilchen wegen des azimuthalen Magnetfeldes auf Wendebahnen um die Fokusachse laufen, sind Relativgeschwindigkeiten innerhalb des Teilchenstrahles senkrecht zur Strahlachse möglich. Dadurch kommt eine „Strahl-Strahl“-Wechselwirkung zustande, welche die experimentell ermittelte Neutronenausbeute im wesentlichen wiedergibt. Dieses Modell gibt darüber hinaus die Anisotropie des Neutronenflusses besser wieder als die bisher bekannten „Strahl-Target“ und „Moving-Boiler“-Modelle.

4.6 Erweiterung der MHD-Rechnungen am Plasmafokus

Der MHD-Code von Potter wurde für allgemeineren Einsatz umgeschrieben und verbessert. Die Strahlung von Verunreinigungen wurden in den Code aufgenommen. Ferner wurde die Viskosität durch Einführung eines neuen Drucktensors in verbesserter Form berücksichtigt. Skalierungsrechnungen zum Aufbau eines geplanten Hochvoltfokus (120 kV, 24 kJ) wurden durchgeführt.

4.7 „Finite-element“-Methoden bei MHD-Rechnungen

Untersuchungen zur Anwendung der „finite-element“-Methode bei MHD-Rechnungen wurden am Beispiel der vereinfachten *Navier-Stokes*-Gleichungen durchgeführt. (Vorteile der „finite-element“-Methode: Variable Maschenweite, bessere Geometrieangepassung.) Für die Anwendung am Plasmafokus ist noch sehr viel Entwicklungsarbeit nötig. Die Untersuchungen wurden daher zunächst eingestellt.

4.8 Analogiebetrachtungen und Skalierungsgesetze für den Plasmafokus vom Mather-Typ

Bei der Beschreibung der dynamischen Vorgänge im Kompressionsbereich eines Plasmafokus gab es bisher Schwierigkeiten in der Definition des kleinsten Plasmaradius. Mit Hilfe eines vereinfachten Schneepflugmodells und eines Diffusionsmodells wurde der kleinste Radius für den Zustand definiert, bei dem die Diffusionsgeschwindigkeit des Magnetfeldes ins Plasma größer wird als die Kompressionsgeschwindigkeit. Diese Definition des kleinsten Plasmaradius beim Fokus bildet den Kernpunkt für Skalierungsgesetze, die hinsichtlich der Neutronenproduktion auf ein Beschleunigungsmodell abgestimmt werden. Bei der Anwendung dieser Skalierungsgesetze spielt die elektrische Leitfähigkeit in der dichten Fokusphase eine wesentliche Rolle. Die Plasmalebensdauer wird vor allem durch die Leitfähigkeit bestimmt, wenn man das Diffusionsmodell anwendet. Die Annahme der Gleichheit von Elektronen- und Ionentemperatur in der dichten Phase gibt zwar einen plausiblen Wert für die Gesamtlebensdauer, kann aber lokale Strukturen nicht erklären.

4.9 Neurographie

Im Rahmen erster Kontrastuntersuchungen wurde festgestellt, daß bereits mit einem Wert von $5 \cdot 10^4$ Neutronen/cm² ein meßbarer Kontrast erzielt werden kann (Kontraststufe aus Polyäthylen). Die Arbeit wird mit dem Ziel fortgeführt, nunmehr etwa 40–400 Bildpunkte zu gewinnen.

4.10 Versuche der Wechselwirkung des Fokusplasmas mit einem Festkörper

Es erscheint denkbar, die sehr großen Magnetfelder, welche in Fokusmaschinen erreicht werden, zur Festkörperkompression auszunützen. Als Vorversuche hierzu wurde ein 90 μ CD₂-Faden auf der Fokusachse angebracht. Es ergaben sich folgende Befunde:

- 1) Die Plasmafokussierung und Neutronenproduktion ist auch in Gegenwart des Fadens möglich.
- 2) Auch bei etwas exzentrischer Lage des Fadens (einige mm außerhalb der Achse) bildet sich das Fokusplasma am Ort des Fadens.

Veröffentlichungen des Instituts für Plasmaforschung der Universität Stuttgart

H. F. Döbele, K. Hirsch

Detection of weak Thomson scattered Radiation from a magnetized arc using a CW Argon Ion Laser
Phys. Lett. 46A, 352, (1974)

G. Janzen, W. Staib, G. Kruppa, U. Schücker und H. Suhr

Die Messung der Elektronendichte in Gasentladungen verschiedener mehratomiger Gase

Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie 78, 440, (1974)

H. J. Kaeppler and N. Ruhs

Similarity Laws in Turbulent Focus Plasma with Beam-Beam Neutron Production

Phys. Lett. 49A, 383, (1974)

G. Müller

Experimental Study of Torsional Alfvén Waves in a Cylindrical Partially Ionized Plasma

Plasma Phys. 16, 813, (1974)

H. Salzmann, H. Strohwald

High Power Subnanosecond Pulse from a TEA Nitrogen Laser with Travelling Wave Excitation

Optics Communications 12, 370, (1974)

Konferenzberichte

Vorträge auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Stuttgart 1974.

K. Hirsch, H. F. Döbele

Thomsonstreuung an einem stationären, magnetfeldstabilisierten Wasserstoffbogen mit einem CW-Argon-Ionenlaser. Vortrag P-44

G. Janzen, K. Tichmann

Entwicklung einer neuen Plasmaquelle im Elektronendichtebereich $n_e 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Vortrag P-51

A. Gondhalekar, E. Holzhauser

CO₂-TEA-Laser hoher Leistung mit einer axialen Mode. Vortrag P-61

E. Räuchle

Ausbreitung von Plasmamagnetischen Wellen. Fachbericht P-75

E. Räuchle und P. G. Schüller

Torsions-Alfvén-Wellen in axialsymmetrischen inhomogenen Magnetfeldern. Vortrag P-76

G. Müller

Einfluß von Neutralgas auf Dispersion und Polarisation von Alfvén-Wellen. Vortrag P-77

G. Janzen, W. Staib

Experimente mit verschiedenen HF-Plasmaquellen zur Füllung der Spiegelmaschine Eliza. Vortrag P-49

G. Janzen, W. Staib

Plasmaerzeugung mit Hilfe einer koaxial angekoppelten Mi-

krowellenantenne in der Spiegelmaschine Eliza. Vortrag P-50

G. Janzen, W. Staib, G. Kruppa, U. Schücker, H. Suhr

Elektronendichte und Stoßfrequenzmessungen in Gasentladungen bei verschiedenen mehratomigen Gasen. Vortrag P-67

G. Pross

Einflüsse von Geometrien auf den Ablauf von Plasmafokusexperimenten. Vortrag P-79

H. Rapp

Ergebnisse der Neutronenspektroskopie am Plasmafokus. Vortrag P-80

D. Ruffner, H. Rapp und E. Räuchle

Ein Verfahren zur Kurzzeit-Radiographie schneller Neutronen. Vortrag P-81

R. Schön

Zeitaufgelöste Messungen der weichen Röntgenstrahlung am Plasmafokus. Vortrag P-82

H. Schmidt

Lichtemissionsmessungen vom UV bis mittleren Infrarot und interferometrische Dichtebestimmung am Plasmafokus. Vortrag P-83

K. Schwörer

Der Einfluß hoher Diffusionsgeschwindigkeiten auf die Transportvorgänge in Gasgemischen. Vortrag P-91

F. Moser

Vergleich hinreichender Kriterien für den absoluten Charakter einer Instabilität am Beispiel der helikalen Instabilität der positiven Säule im axialen Magnetfeld. Vortrag P-90

W. Kunz, G. Dodel

Strahlablenkungsexperimente mit einem HCN-Laser bei 337μ . Vortrag P-95

H. F. Döbele

Gegenwärtige Möglichkeiten und Entwicklungslinien der Plasmadiagnostik mit Laser. Hauptvortrag H-20

8th Int. Quant. Electronics Conf. San Francisco, Cal. June 74,

A. Gondhalekar, N. R. Heckenberg, E. Holzhauser

Single longitudinal mode operation of the high pressure pulsed CO₂-laser. Paper P11

Dissertationen

H. Frey

Experimentelle und theoretische Untersuchung des Nichtgleichgewichtsverhaltens einer Edelgas Mischung bei Stromdurchgang.

Dissertation Universität Stuttgart 1974.

P. G. Schüller

Experimentelle Untersuchung von Torsions-Alfvén-Wellen in inhomogenen axialsymmetrischen Magnetfeldern.

Dissertation Universität Stuttgart 1974. (Bericht IPF-74-4)

Diplomarbeiten

D. Bauer

Ein Impulsverzögerungsgerät.

Th. Bloch

Berechnung der Ausbreitungseigenschaften ebener Wellen im homogenen Plasma in Abhängigkeit von Ausbreitungsrichtung und Plasmaparametern.

H. Hecht

Untersuchung der Dispersionsgleichung nichtlokaler Driftwellen. (Bericht IPF-74-5)

W. Kunz

Schlierenplasmadiagnostik mit dem HCN-Laser. (Bericht IPF-74-8)

B. Nahrath

Raum- und zeitaufgelöste Messungen der Röntgenemission am Plasmafokus. (Bericht IPF-74-11)

D. Ruffner

Neurographie am Plasmafokus. (Bericht IPF-74-3)

P. Schilling

Entwicklung eines gepulsten Fluorwasserstoff-Lasers (Pulsbreite 10 ns; für Dichtemessungen am Plasmafokus). (Bericht IPF-74-12)

R. Schön

Untersuchung der Intensitäts- und Energieverteilung der von einer Plasma-Fokusanlage emittierten Röntgenstrahlung. (IPF-INT-74-1)

I. Streich

Untersuchung der Verwendungsmöglichkeit eines integrierenden analogen Schieberegisters zur Signalspeicherung.

Laborberichte

H. Rapp

Experimentelle Untersuchung der Betriebscharakteristik eines Plasmafokus. (Bericht IPF-74-1)

F. Moser

Bestimmung und numerische Lösung der Dispersionsgleichung von Zylinderwellen der Dichte und des Potentials in der positiven Säule einer Gasentladung im axialen Magnetfeld mit Hilfe des Galerkin'schen Verfahrens. (Bericht IPF-74-2)

N. Ruhs

Ein Vielteilchenmodell zur Beschreibung der Neutronenproduktion im Plasmafokus. (Bericht IPF-74-6)

H. Frey

Experimentelle und theoretische Untersuchung der überthermischen Leitfähigkeit einer Überschallströmung bei Stromdurchgang. (Bericht IPF-74-9)

K. Schwörer

Untersuchung des Einflusses hoher Diffusionsgeschwindigkeiten auf die Transportvorgänge in Gasgemischen nach der Momentenmethode. (Bericht IPF-74-10)

JAHRESBERICHT 1974

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik · Garching bei München

Redaktion und Gestaltung: Helmuth F. Wüst, Garching

Maschinensatz und Typographie: Industriesatz Meixner GmbH, München

Fotosatz und Repro: Satz 2000 GmbH, München

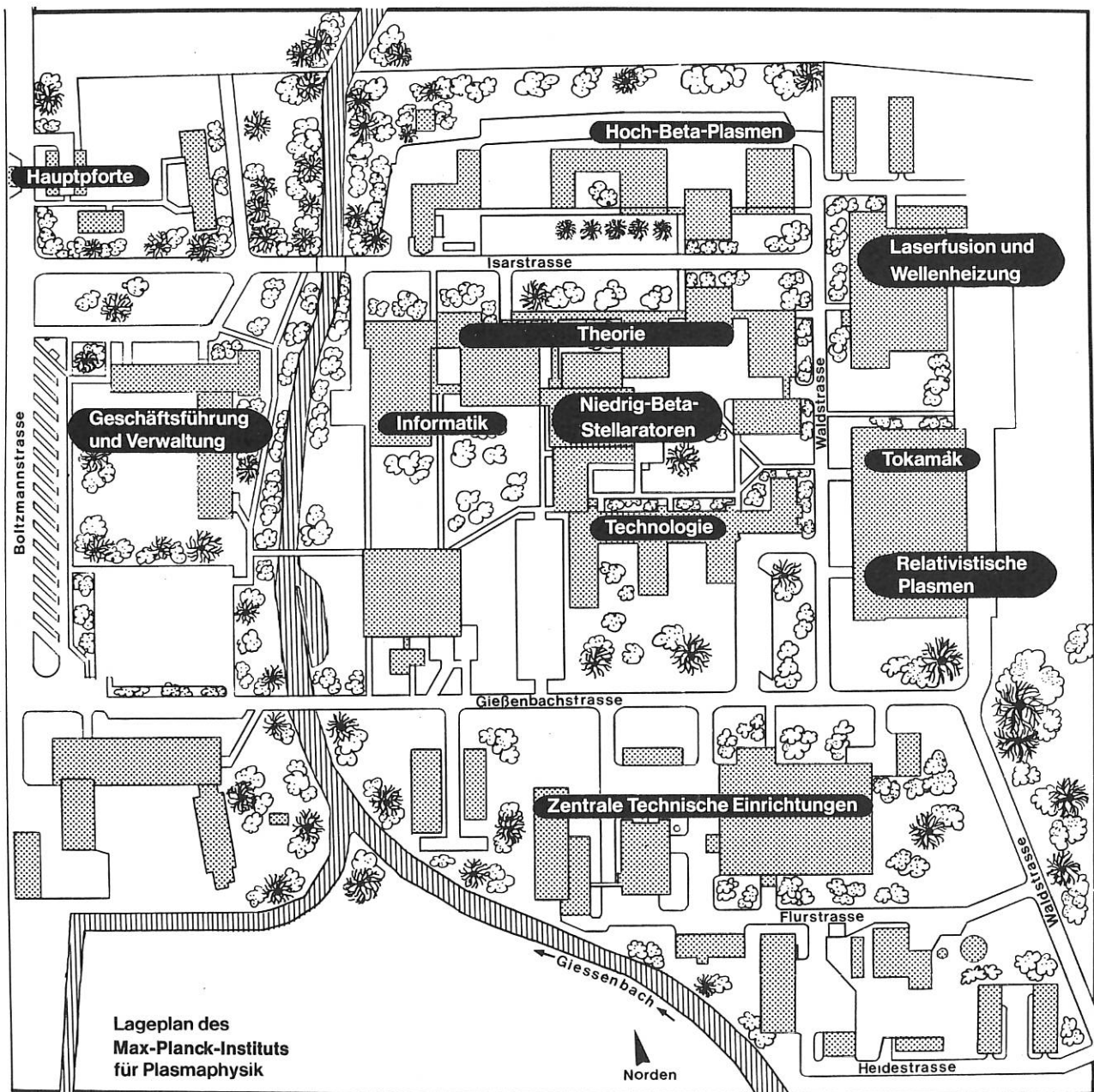
Zeichnungen: Dieter Wunsch BDG, München

Farbfoto (1. Umschlagseite): Dagmar Hamann, Stuttgart

Herstellung: Buch- und Kunstdruckerei Brenner + Stanglmeier KG, München

© 1975 Copyright by IPP GARCHING

Printed in Germany



This IPP report is intended for internal use.

IPP reports express the views of the authors at the time of writing and do not necessarily reflect the opinions of the Max-Planck-Institut für Plasmaphysik or the final opinion of the authors on the subject.

Neither the Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, nor the EURATOM Commission, nor any person acting on behalf of either of these:

1. Gives any guarantee as to the accuracy and completeness of the information contained in this report, or that the use of any information, apparatus, method or process disclosed therein may not constitute an infringement of privately owned rights; or
2. Assumes any liability for damage resulting from the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this report.

IPP

