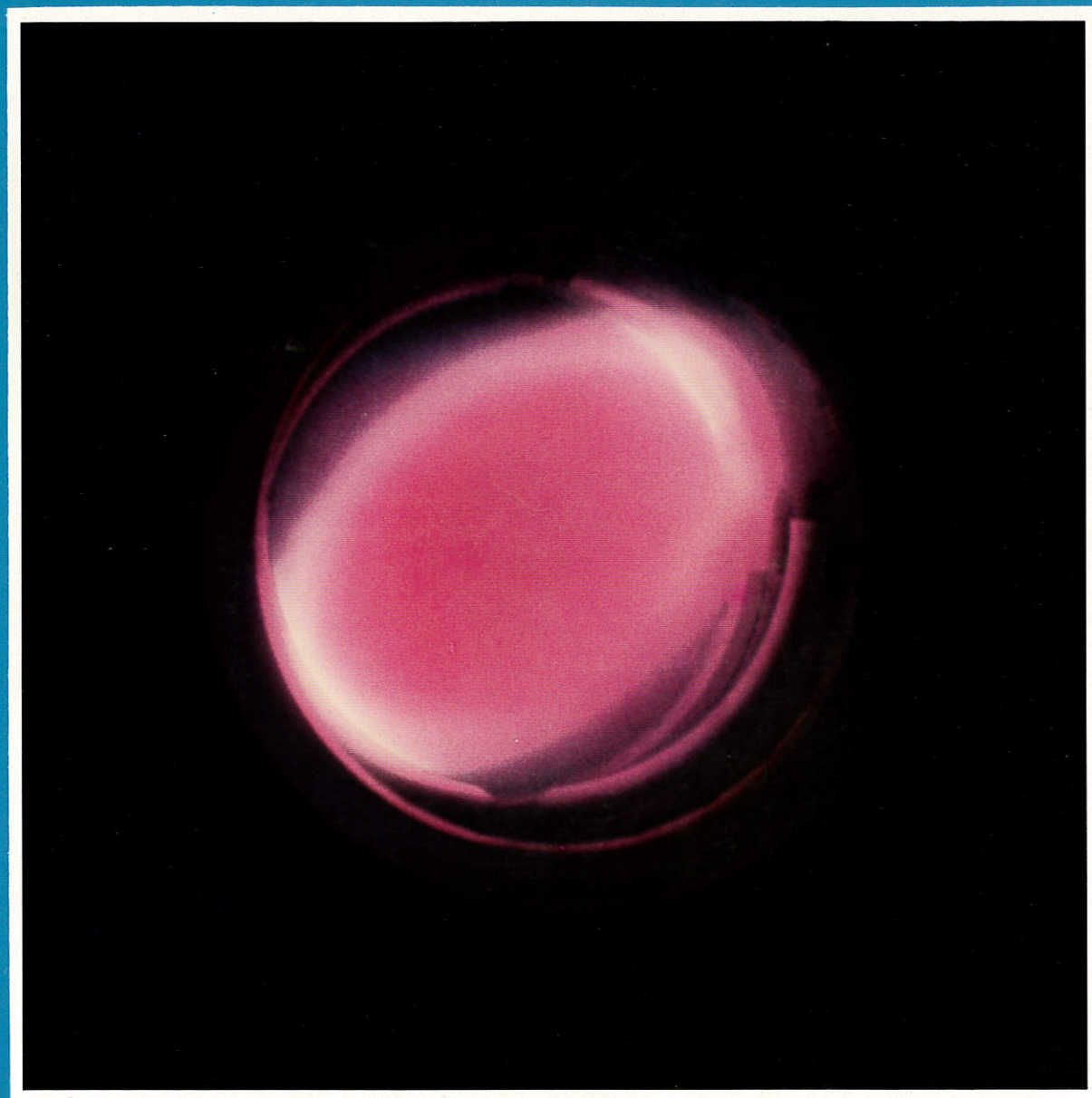


**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN**



JAHRESBERICHT 1976

764

Das Farbfoto auf der ersten Umschlagseite ist eine Aufnahme des Wasserstoffplasmas im Stellarator W VII A des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik. Das Bild wurde in tangentialer Richtung zur Plasmasäule aufgenommen und zeigt den Querschnitt des Plasmas in der Ebene des Limiters. Die durch das äußere Stellaratorfeld erzwungene elliptische Form des Plasmas ist deutlich zu erkennen. Das ausgestrahlte rote Licht wird von Verunreinigungsatomen erzeugt. (Aufnahme: Dr. Fritz Rau)

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

Jahresbericht 1976



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 357.59

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	3
Die wissenschaftlichen Bereiche des Instituts	4
Bereich Hoch-Beta-Plasmen	5
1. Hoch-Beta-Stellarator	6
2. Belt-Pinch	10
3. Diagnostik im Bereich Hoch-Beta-Plasmen	14
Bereich Niedrig-Beta-Stellaratoren	15
1. Stellarator W VII A	16
2. WEGA	27
Bereich Tokamak	32
1. Projekt PULSATOR	33
2. Projekt ASDEX	40
3. Elektroniklabor	47
4. Wellen im Plasma	47
5. JET-Joint European Torus	53
Bereich Theorie	55
1. Magnetohydrodynamische Untersuchungen	56
2. Transportphänomene	58
3. Entwicklung numerischer Methoden	62
4. Bibliothek, Dokumentation	62
Projekt Plasma-Wand-Wechselwirkung	64
1. Experiment QWAASS	64
2. Überlegungen zur PWW u. Sammlung v. Daten	66
3. PHARAO, BOMBARDINO, 2,5 MV-Beschleuniger	66
4. BOMBARDON	68
5. Hochstromionenquelle	69
6. SORBAS (Rückstreuung niederenergetischer Ionen)	70
7. Ionenmikrostrahlsonden	71
8. Experiment ESCA	73
9. Spinpolarisierte Elektronen (SFB 128)	73
Bereich Informatik	74
1. Betrieb der Rechenanlage	74
2. AMOS-Entwicklung	77
3. Projekt Datenerfassung	78
4. EDF für das Rechnungswesen	79

Bereich Relativistische Plasmen	80
1. Elektronenring-Beschleuniger-Experiment SCHUKO	80
2. Elektronenring-Beschleuniger-Experiment PUSTAREX	82
3. Theoretische Arbeiten	83
Bereich Technologie	85
1. Neutralinjektion	86
2. Laser-Plasma-Quelle	89
3. Programm „Magnete für die Fusion“	95
4. Supraleitender W VII – Prototypmagnet	98
5. Systemstudien	99
Zentrale technische Einrichtungen	103
1. Abgrenzung des Arbeitsgebietes, Auftrags- volumen und Auftragsabwicklung	104
2. Personelle und räumliche Entwicklung	104
3. Fachabteilung Elektro- und Hochspannungs- technik	104
4. Fachabteilung Elektronik	106
5. Fachabteilg. Material- u. Vakuumtechnik	107
6. Fachabteilung Chemie und Galvanik	107
7. Zentrale Konstruktion	108
8. Zentrale Fertigungsvorbereitungen	108
9. Zentrale Mechanische Werkstätten	109
10. Örtliche Werkstatt L 5	110
11. Zentrale Läger	110
12. Gerätepool	111
13. Energieversorgung und Betriebstechnik	111
Organisationsstruktur des IPP	113
Kaufmännische Geschäftsführung, Verwaltung, Allgemeine Dienste	117
Sicherheitsorganisation	120
Öffentlichkeitsarbeit	121
Veröffentlichungen, Konferenzberichte	123
Diplomarbeit/Dissertationen	139
Laborberichte	140
Autorenverzeichnis 1976	142
Projekte des IPP an Hochschulen	
1. Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart	149
2. Institut für Festkörperphysik, Lehrstuhl E 20, der Technischen Universität München	161
IMPRESSUM und Lageplan des IPP	162

VORWORT

Die durch die Fortschritte in der Fusionsforschung bedingte Konzentration der experimentellen und theoretischen Untersuchungen auf wenige Großexperimente macht sich auch im wissenschaftlichen Programm des Instituts in immer stärkerem Maße bemerkbar.

In allen drei Hauptrichtungen, auf denen das Institut arbeitet, wurden im Jahre 1976 wesentliche Ergebnisse erzielt. Hervorzuheben sind die guten Anfangsergebnisse, die bereits kurz nach der Inbetriebnahme des Stellarators WVIIA erreicht wurden. An den vom IPP gemeinsam mit der CEA Grenoble und ERM Brüssel in Grenoble durchgeführten Experiment WEGA konnten gute Erfolge mit der HF-Heizung bei der unteren Hybridfrequenz erzielt werden.

Weitere bemerkenswerte Fortschritte waren beim Betrieb von PULSATOR zu verzeichnen. Insbesondere konnten hier Beiträge zur Klärung der Abbruchinstabilität geleistet werden.

Der Aufbau von ASDEX geht planmäßig voran. Leider hat sich der Beginn des Aufbaus des Hoch-Beta-Stellarators durch die fehlende Entscheidung über den JET-Standort hinausgezögert, so daß nur erweiterte Voruntersuchungen durchgeführt werden konnten.

Ein neuer Schwerpunkt der Institutsarbeit wird in den nächsten Jahren der Einsatz von Neutralinjektion bei den Experimenten WVIIA und ASDEX sein. Alle übrigen Aktivitäten entwickeln sich in zunehmendem Maße auf die Unterstützung der großen Experimente hin.

Die Arbeiten des Instituts konnten eingehend auf dem Symposium on Fusion Technology (Juni, Garmisch-Partenkirchen) und auf der 6th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Oktober, Berchtesgaden) sowie bei den anschließenden Besichtigungen des Instituts durch die Tagungsteilnehmer dargestellt werden.

Die direkte Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München und dem Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart wurde erfolgreich fortgeführt und durch die Übernahme des Hochspannungs-Belt-Pinch Experiments durch das IPF Stuttgart weiter verstärkt.

Die wissenschaftlichen Bereiche des Instituts

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 (abgeordnet zur EG)
Dr. G. von Gierke (kommissarisch)

Projekt WENDELSTEIN VII A

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

Projekt WEGA

- Betrieb des Stellarators WEGA in Grenoble
- Plasmaheizung durch HF

Bereich Tokamak

Direktor: Dr. G. von Gierke

Projekt PULSATOR

- Gleichgewicht und Stabilitätsverhalten eines Tokamak-Plasmas
- Abbruchinstabilität
- Stabilisierung durch schwache helikale Felder
- Magnetische Limiter
- hochdichte Tokamak-Plasmen

Projekt ASDEX

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

LIWEREX

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

JET

- Mitarbeit am gemeinsamen europäischen Tokamak

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 Technologie

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

Projekt Laser-Pellet-Quelle

- Entwicklung von Pellet-Quellen
- Füllung von magnetischen Einschlußexperimenten mit lasererzeugten Plasmen
- kalte Nachfüllung von Fusionsapparaturen durch Pelleterosion

Projekt Systemstudien

- Computermodelle für Fusionsreaktorsysteme
- Vergleich verschiedener Reaktorkonzepte

Projekt Neutralinjektion

- Bau der Injektionssysteme für W VII A und ASDEX
- Durchführung der Injektionsexperimente

Magnete für die Fusion

- Entwicklung supraleitender Magnete in Zusammenarbeit mit der GfK Karlsruhe

Bereich Informatik

Direktor: Prof. Dr. F. Hertweck

Betrieb der Rechenanlagen IBM 360/91 und AMDAHL 470 V/6

Entwicklung des Betriebssystems AMOS

Projekt Datenerfassung

- Entwicklung von Datenerfassungssystemen für die Experimente des IPP

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

Die Erzeugung sehr heißer Plasmen mit stabilem Gleichgewicht und hohem Beta ist das Ziel aller fusionsorientierten Plasma-Experimente. Unter Hoch-Beta-Plasmen versteht man etwas ungenau Plasmen, die durch schnelle, magnetische Kompression hergestellt werden und deswegen ohne Schwierigkeiten hohe Beta-Werte erreichen. Im Gegensatz dazu ist es mit dem heute im Vordergrund stehenden Tokamak-Prinzip noch nicht möglich, Beta-Werte zu erreichen, die für einen Fusionsreaktor erforderlich sind. Andererseits ist das Tokamak in Bezug auf Gleichgewicht und Stabilität den durch schnelle Kompression erzeugten Hoch-Beta-Plasmen überlegen.

Bei dieser Sachlage erscheint es durchaus berechtigt, beide Linien weiter zu verfolgen, wenn auch mit deutlich verschiedenem Aufwand. Es hat sich nämlich gezeigt, daß eine Reihe von Fragen, die in Tokamaks z. B. wegen zu kleinen Beta-werten heute noch nicht geklärt werden können, mit geringem Aufwand in den bestehenden, bzw. noch in Planung befindlichen Hoch-Beta-Experimenten beantwortet werden können. Umgekehrt sind Probleme, die heute bei Hoch-Beta-Experimenten wegen ihrer kurzen Lebensdauer – verglichen mit Tokamaks – nicht auftreten, aus den Tokamak-Experimenten bekannt und können mit Nutzen für die Weiterführung der Hoch-Beta-Experimente untersucht werden, z. B. Transportphänomene.

Überlegungen dieser Art haben die Zielsetzung der Hoch-Beta-Experimente dieses Bereichs, des Hoch-Beta-Stellarators (HBS II) und besonders des Belt-Pinches (BP IIa) und einer speziellen Variante, des Hochspannungs-Belt-Pinches, bestimmt.

Leider haben auch in diesem Jahre die Unsicherheiten im europäischen Rahmen – insbesondere über den Standort von JET – den Beginn des technischen Aufbaus von HBS II verhindert. Neben einer Reihe von experimentellen und diagnostischen Vorarbeiten wurden die technischen Voruntersuchungen durch den Aufbau eines Prototyps der Hauptfeldbatterie fortgesetzt. Auf theoretischer Seite wurden einerseits Stabilitätsuntersuchungen in einem erweiterten 2-dimensionalen Programm (Gyroviskosität) durchgeführt. Andererseits wurde ein numerisches Programm zum Auffinden allgemein dreidimensionaler MHD-Gleichgewichte begonnen, bei dem in einer beliebigen Anfangsverteilung von Druck und Magnetfeld der unter Massen- und Flußerhaltung erreichbare Endzustand minimaler Energie berechnet wird.

Der Belt-Pinch stellt eine axial-symmetrische und damit Tokamak-ähnliche Konfiguration dar, in der Wege zu höherem β untersucht werden. Dabei werden in diesen Experimenten die zwei wohl aussichtsreichsten Varianten des zunächst einfachen Tokamak-Gleichgewichts in extremer Weise vorgenommen: stark nicht-kreisförmiger Plasmaquerschnitt und β_{pol} -Werte im Grenzbereich $\beta_{pol} \approx$ Aspektverhältnis. Unter diesen Bedingungen konnten im BP IIa auch für β -Werte von

einigen 10% günstige Stabilitätseigenschaften zumindest auf der MHD-Zeitskala (100 μ s Bereich) erreicht werden. Der Plasmaeinschluß ist im großen Belt-Pinch weitgehend durch Verunreinigungsstrahlung begrenzt. Um hier einen wesentlichen Fortschritt zu erzielen, wurde im Hochspannungs-Belt-Pinch versucht, durch extrem starke Kompression zu interessanten Plasmaparametern zu gelangen und vor allem die „Strahlungsbarriere“ zu durchbrechen.

1. Hoch-Beta-Stellarator

(M. Kaufmann, H.-U. Fahrbach, J. Gruber, F. Herrnegger, W. Köppendörfer, E. Lackner, W. Lotz, M. Münich, J. Neuhauser, E. Oberlander, G. Reichert, H. Röhr, K. Schindler, W. Schneider, G. Schramm, U. Seidel, J. Sommer, R. Süß, R. Wunderlich)

Leider konnte auch im Jahre 1976 nicht mit dem Aufbau von HBS II begonnen werden, da eine endgültige Genehmigung nicht erteilt wurde.

Die Verzögerung wurde u. a. dazu benutzt, einen Sektor der HBS II-Hauptfeldbatterie für technische Tests aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. An ISAR 1 wurden die Untersuchungen zur Gyrostabilisierung abgeschlossen. Es konnte gute Übereinstimmung mit numerischen Berechnungen von Anwachsraten bei Berücksichtigung der Gyroviskosität erzielt werden.

Nach Abschluß der Untersuchung zur Gyrostabilisierung wurde ISAR 1 in ein Experiment zur Untersuchung der Vorionisierung in toroidaler Geometrie (TORIX) umgebaut und mit ersten Experimenten begonnen. Hier werden die zunächst in linearer Geometrie an ISAR II begonnenen Untersuchungen in toroidaler Anordnung fortgesetzt, um möglichst unter realistischen Bedingungen eine optimale Vorionisierung von HBS II zu finden.

1.1 Aufbau eines Sektors der HBS II-Batterie

Als sich zu Anfang des Jahres abzeichnete, daß die Genehmigung von HBS II nicht in absehbarer Zeit erfolgen würde, wurde der Vorschlag gemacht, einen 2-m-Sektor der Hauptbatterie und 6 m der Spule für technische Testzwecke vorweg aufzubauen. Nach der Genehmigung im März konnten die notwendigen Aufträge vergeben werden und der Aufbau beginnen. Die Hauptfeldbatterie konnte mit geringfügiger Verzögerung zum Jahresende in Betrieb genommen werden (vgl. Abb. 1). Entladungen wurden mit voller Spannung (2x40 kV) durchgeführt und haben die Zieldaten für den Magnetfeldanstieg bestätigt.

Der Probeaufbau von 2 m der Hauptfeldbatterie wird einen endgültigen Aufbau der Batterie wesentlich erleichtern, da Erfahrungen mit der Montage gesammelt wurden, und kleinere Unzulänglichkeiten ausgemerzt werden konnten. Dasselbe gilt für Spule, Gefäß und Bewicklung. Die Herstellung von 8 m der kompliziert geformten Spule hat keine Schwierigkeiten gezeigt.

Während des beschriebenen Aufbaus wurde der Testbetrieb am 1/2-m-Prototyp-Baustein bis zu 10000 Entladungen weitergeführt, um insbesondere den Abbrand der Funkenstrecken bei hohen Entladungszahlen zu verfolgen. Es hat sich gezeigt, daß die Funkenstrecken für diese Entladungszahl voll funktionsfähig bleiben.

Parallel zu diesem Batterietest wurden 40 kV- und 3 kV-Kondensatoren mit befriedigenden Ergebnissen getestet und andere technische Entwicklungen weitergeführt.

1.2 Toroidaler Hoch-Beta-Stellarator ISAR T1-B

Wegen der Bedeutung des an der ISAR 1-Batterie geplanten Vorionisierungsexperiments TORIX für das HBS II-Projekt mußten die Hoch-Beta-Stellarator-Experimente eingestellt werden. In der verbleibenden Zeit wurde neben einigen ergänzenden Messungen insbesondere die Abhängigkeit der Gyrostabilisierung von der Ionenmasse (Wasserstoff statt des üblichen Deuteriums) untersucht. Sie entsprach innerhalb der Fehler den theoretischen Erwartungen / 11 /.

Gleichzeitig konnte die Stabilitätsgrenze für $m = 2$ Moden bis zu $\omega_g \cdot \tau_{ii} \approx 20$, also weit in den stoßfreien Bereich hinein vermessen werden. Es ergab sich keine erkennbare Abhängigkeit von der Stoßfrequenz, so daß eine Verfälschung des Gyroeffekts durch Ion-Ion-Stöße praktisch ausgeschlossen werden kann. Die kritische Größe des Gyroradius im ISAR T1B-Experiment ist damit endgültig $(r_g/a)_{crit} = 0.14 \pm 10\%$, bezogen auf den Halbwertsradius des Dichteprofiles.

Die im instabilen Bereich gemessene Anwachsrates, normiert auf die thermische Laufzeit eines Ions über den Plasmaradius war $\tilde{\gamma} = \gamma / (v_{th}/a) \approx 0,16 \pm 30\%$ und damit um den Faktor 2 unter dem Oberflächenstromwert bzw. knapp über dem realistischeren Wert von Herrnegger und Schneider (siehe Abschnitt 1.3. und / 12 /).

In Abb. 2 wird der experimentelle Wert mit verschiedenen Theorien verglichen. $(r_g/a)_{crit}/\tilde{\gamma}$, bezogen auf die Plasmamitte, ist über dem Plasma-Beta aufgetragen, so daß die Oberflächenstrom-Modelle horizontale Geraden ergeben. Es zeigt sich klar, daß die alte Freidberg-Grenze viel zu pessimistisch war. Dagegen kommen die inzwischen bekannt gewordenen Theorien – insbesondere solche mit diffusem Druckprofil – dicht an unseren Meßwert heran.

Damit dürfte die Gyrostabilisierung auf der MHD-Zeitskala theoretisch und experimentell ausreichend geklärt sein.

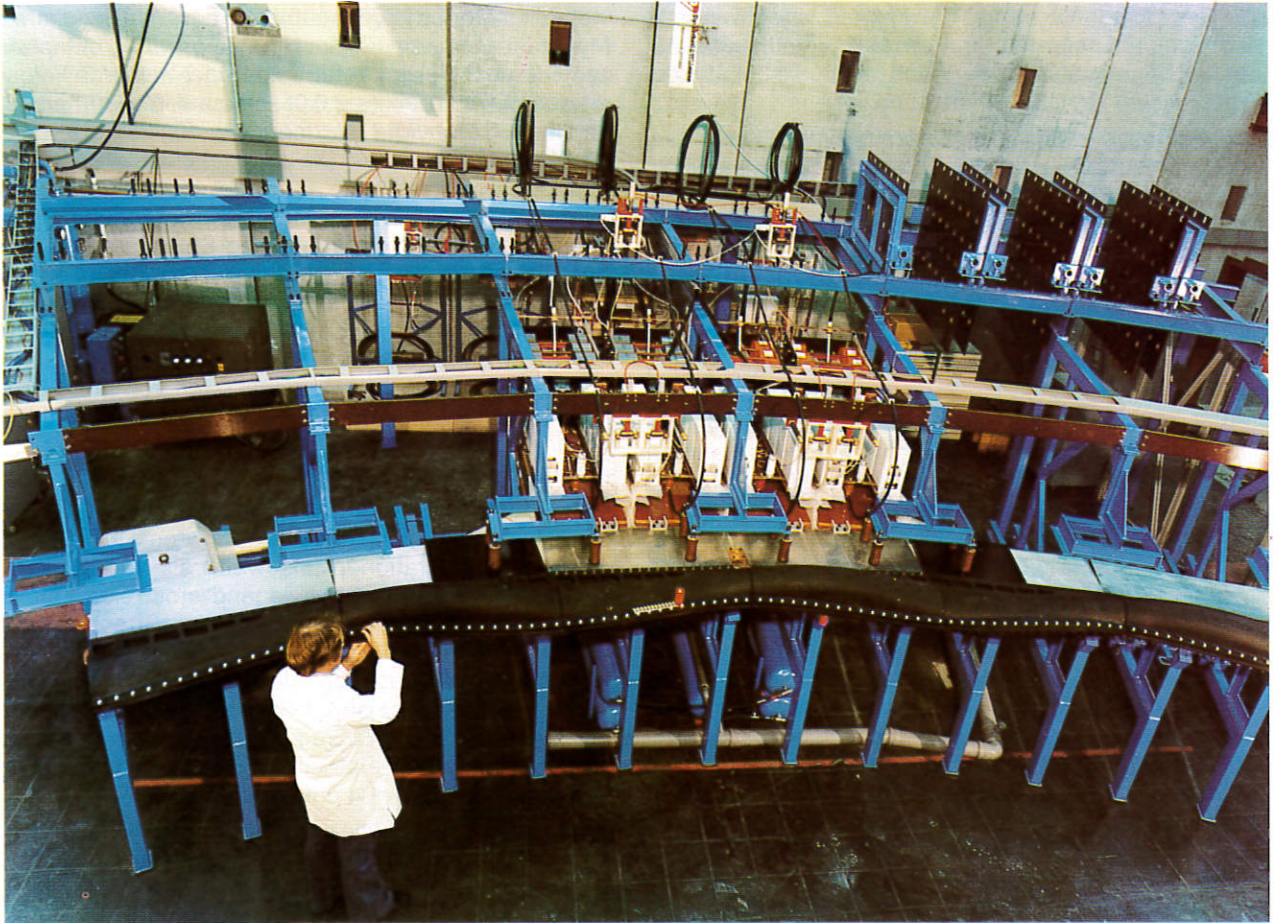


Abb. 1: Ein Sektor der HBS II-Batterie für technische Testzwecke. 2 m der schnellen Hauptfeldbatterie und 6 m der Spule sind aufgebaut.

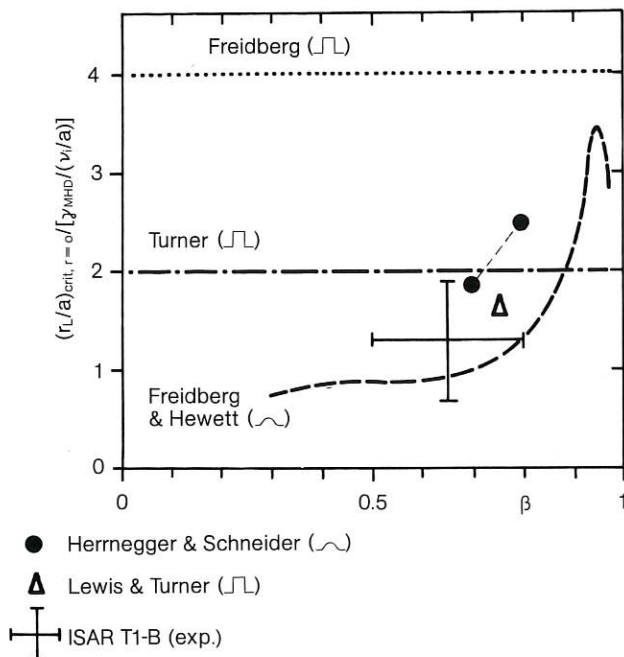


Abb. 2: Der für Gyroradienstabilisierung kritische Radius normiert auf den Plasmaradius $(r_g/a)_{crit}$ als Funktion von β . Vergleich zwischen Theorie und Experiment

1.3 Moden-Analyse helikaler Gleichgewichte und Gyroviskositätseffekte

Die theoretische Untersuchung der Stabilität helikal-symmetrischer $l=1$, hoch- β -Gleichgewichte mit beliebigem Druckprofil ist für das HBS II-Projekt von wesentlicher Bedeutung, weil in führender Ordnung das Stabilitätsverhalten von toroidalen Gleichgewichten mit großem Aspektverhältnis und vielen Perioden auf dem Umfang durch die Stabilitätseigenschaften von helikal-symmetrischen Gleichgewichten bestimmt wird. Es wurde ein Rechenprogramm entwickelt, / 12 /, mit dem das volle zweidimensionale Eigenwert-Problem mit einer Fourier-Analyse in der vernachlässigbaren dritten Richtung iterativ als Anfangswertproblem behandelt worden ist. Damit sind die globalen MHD-Eigenfunktionen und Eigenwerte in helikalen Gleichgewichten berechenbar. Die hier interessierenden MHD-Gleichgewichte sind durch die folgenden fünf frei vorgebaren Parameter vollständig bestimmt.

Beta auf der magnetischen Achse,
 helikale Verformung δ_1 der magnetischen Achse (bezogen auf den Plasmaradius a),
 Periodizitätszahl ϵ des $l=1$ Feldes,
 Kompressionsverhältnis b/a (Wandradius zu Plasmaradius),
 normierter longitudinaler Nettostrom J_c .

Für das HBS II-Projekt ist der Fall mit verschwindendem longitudinalen Nettostrom auf jeder Flußfläche der wichtigste Fall, worauf sich auch die folgenden Ergebnisse (/12/, /13/, IPP 1/161) beziehen.

Im Jahresbericht 1975 sind bereits einige Ergebnisse über Abhängigkeit der Anwachsrate in Abhängigkeit der angeführten Parameter angegeben worden. In Abb. 3 ist die Dispersionskurve γ über ka für eine

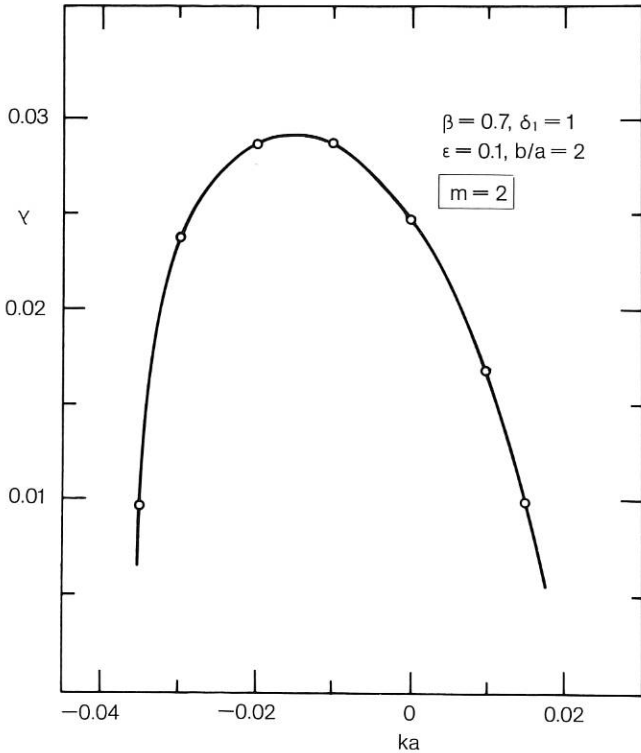


Abb. 3: Dispersionskurve γ als Funktion von ka einer $m = 2$ Eigenfunktion in einem helikal-symmetrischen $l = 1$ Gleichgewicht ($\Delta x = 0.06 J_c = 0$)

$m = 2$ Mode in einem helikal-symmetrischen MHD-Gleichgewicht dargestellt (k ist die Wellenzahl der Eigenfunktionen in longitudinaler z -Richtung; γ wird in Einheiten der inversen Alfvéntransitzeit über den Plasmaradius angegeben; m ist die azimutale Modenzahl; die Gitterweite ist hier $\Delta x = 0.06$). Das Maximum der Dispersionskurve liegt nicht bei $ka = 0$, sondern bei $k = -0.015$. Dies hängt mit der endlichen Rotations-transformation zusammen, da die Wellenzahl der instabilsten Mode im wesentlichen gleich jener der Rotationstransformation ist.

Da die $m \geq 2$ Moden eine feinere räumliche Struktur als die $m = 1$ Mode haben, ist ein stärkerer Einfluß der numerischen Dispersion und Dissipation auf die Anwachsrate zu erwarten bei sonst etwa vergleichbarer räumlicher Ausdehnung der Eigenfunktionen. Um diesen Effekt zu verdeutlichen, ist in Abb. 4 der Eigenwert gegen $(\Delta x)^2$ für $m = 1, 2, 3$ ($ka = 0$) Moden in helikalen Gleichgewichten aufgetragen. Die Eigenwerte γ^2 liegen in dieser Darstellung auf Geraden, d. h. sie konvergieren mit $(\Delta x)^2$. Positive Werte für γ^2 entsprechen

instabilen Moden in dem betreffenden Gitter. Die $m = 1$ Mode ist in einem Θ -Pinch-Gleichgewicht mit praktisch vernachlässigbaren Effekten der helikalen Felder untersucht worden ($\epsilon = 0.01 \ll 1$), und man erhält für endliche Gitterweite Δx negative Eigenwerte, d. h. stabile Eigenfunktionen. Die angegebene Extrapolation des Eigenwertes für $\Delta x \rightarrow 0$ ergibt in diesem Fall für γ^2 den Wert null, d. h. die numerische Modenanalyse beschreibt korrekt das marginale Stabilitätsverhalten des Θ -Pinches. Die Konvergenzkurven der $m = 2, 3$ Moden werden zunehmend steiler und daher wird der erforderliche numerische Aufwand zur Bestimmung der Eigenwerte erheblich größer. Die experimentell gemessenen Werte der Anwachsrate von $m = 2$ Moden in stoßbestimmten helikalen Gleichgewichten (siehe Abschnitt 1.2) stimmen gut mit den numerisch ermittelten Werten überein.

Die ideale MHD-Theorie ist somit eine adäquate Beschreibung der globalen Moden in den HBS-Gleichgewichtskonfigurationen insoweit, als das Plasma stoßbestimmt ist. Im überwiegend stoßfreien Fall ist die $m = 2$ Mode experimentell nicht beobachtbar (siehe Abschnitt 1.2) oder hat deutlich kleinere Anwachsrate als aus den idealen MHD-Rechnungen folgen würde. Es ist daher der stabilisierende Einfluß der Ionen-Gyrations-Bewegung auf die $m = 2$ ($ka \ll 1$) Mode in helikal-symmetrischen $l = 1$ Gleichgewichten (typische Werte: $\delta_1 = 1$) untersucht worden / 11 /.

Die Gleichgewichtslösung ist ein MHD-Gleichgewicht mit isotropem Druck. Die linearisierte Stabilitätsanalyse geht von Momentengleichungen für ein stoßfreies Plasma aus (Einflüssigkeitstheorie). Der Hall- und der Elektronendruckterm im Ohm'schen Gesetz werden vernachlässigt, die Gyroviskositätsterme im Drucktensor werden berücksichtigt. Der zusätzliche dimensionslose freie Gyroviskositätsparameter $\mu = 1 / (4 \Omega \tau)$ ist durch die Gyrofrequenz Ω der Ionen, bezogen auf das äußere Referenzmagnetfeld, und die Alfvéntransitzeit τ definiert und beschreibt den Einfluß des endlichen Ionen-Gyroradius. Der Zusammenhang

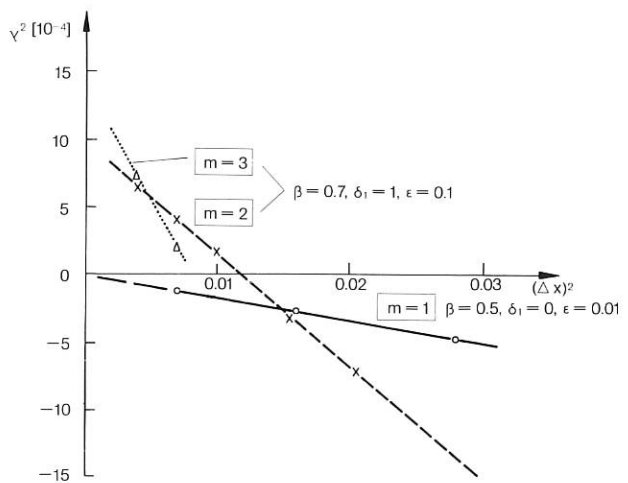


Abb. 4: Konvergenzverhalten der Eigenwerte γ^2 als Funktion von $(\Delta x)^2$ von $m = 1, 2, 3$ ($ka = 0$) Eigenfunktionen in Gleichgewichtskonfigurationen ohne longitudinalen Nettostrom ($J_c = 0, b/a = 2$)

zwischen μ und dem mittleren Gyroradius ist über die thermische Geschwindigkeit V_{thi} und Ω gegeben: $r_g = V_{thi}/\Omega$. Die numerische Behandlung der zusätzlichen Terme in der Bewegungsgleichung erfolgt nach einem ADI-Verfahren. Die überstabilen Eigenfunktionen sind zeitlich anwachsende Wellen, die in azimuthaler Richtung umlaufen. In Abb. 5 ist die Anwachsrate γ einer

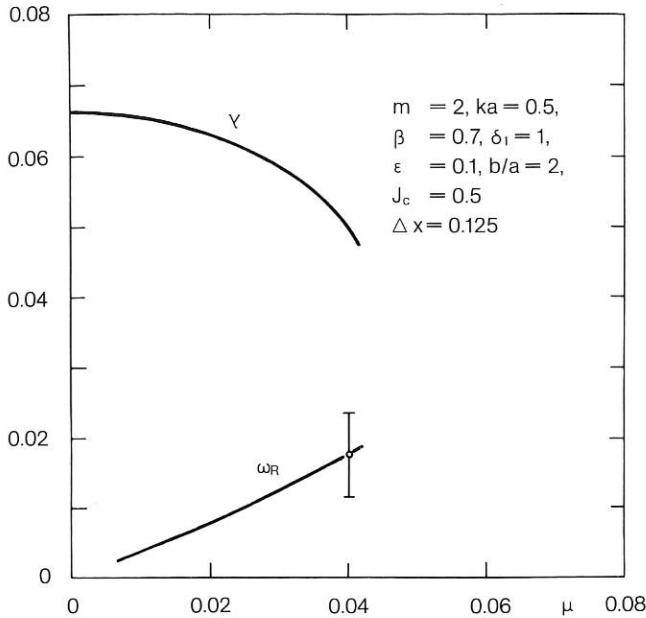


Abb. 5: Anwachsrate γ als Funktion von μ einer $m = 2$ Eigenfunktion in einem helikalen $l = 1$ Gleichgewicht

$m = 2, ka = 0.5$ Eigenfunktion gegen den Gyroviskositätsparameter μ aufgetragen. Mit wachsendem μ (d. h. wachsendem r_g) wird die Anwachsrate stark reduziert. Ein Vergleich der kritischen Gyroradien aus diesen numerisch ermittelten und den experimentell gemessenen Anwachsrate ist in Abb. 9 des Abschnitts 1.2 gegeben. Bei Berücksichtigung der stabilisierenden Gyroviskositätseffekte sind die überstabilen Moden mit wachsendem μ zunehmend stärker um die magnetische Achse lokalisiert.

1.4 ISAR II, ein lineares Vorexperiment zum HBS II

Die Experimente an ISAR II wurden Anfang Mai 1976 abgeschlossen. Die gesamte Anlage wurde anschließend abgebaut und an die Universität Stuttgart ausgeliehen. Das Ziel der Experimente ist gewesen, ein Plasma in linearer Geometrie zu erzeugen, das die für HBS II notwendigen Eigenschaften besitzt und insbesondere die Bedingungen für Wandstabilisierung erfüllt. Die wichtigsten Ergebnisse sind bereits im Jahresbericht 1975 zusammengestellt worden.

Bei geeigneten Zünd- und Vorentladungen konnten die angestrebten Plasmaparameter und das gewünschte niedrige Kompressionsverhältnis erzielt werden. Die Art der Vorentladungen zusammen mit der niedrigen Füllichte führte aber zu erheblicher Plasma-Wandwechselwirkung, wodurch das Plasma mit bis zu 4% Sauerstoff verunreinigt wurde.

Als nächster Schritt wurden deshalb toroidale Zünd- und Vorentladungsexperimente im Hinblick auf HBS II an ISAR T1 aufgenommen (siehe den nächsten Abschnitt).

Auf der IAEA-Konferenz in Berchtesgaden / 15 / wurden die wichtigsten Ergebnisse von ISAR II zusammengefaßt. Neben dem Nachweis der Plasma-Wand-Wechselwirkung über das in der Wand implantierte Deuterium (Jahresbericht 1975) wurde die Schichtverbreiterung und die effektive Stoßfrequenz während der Implosion diskutiert. Wie in anderen Stoßexperimenten können die mittlere Schichtdicke und die Elektronentemperatur erklärt werden, wenn eine effektive Stoßfrequenz von $\nu_{eff} \approx 0,3 \omega_{pi}$ angenommen wird. Da die Elektronentemperatur kleiner als die Ionentemperatur ist, käme allein die Lower-Hybrid-Drift (LHD)-Instabilität als Erklärung für die hohe effektive Stoßfrequenz in Frage. Diese Betrachtung berücksichtigt aber nicht die ausgeprägte Feinstruktur des Plasmas über den Azimuth, die durch „Flute“-Instabilitäten entsteht. Da deren Wellenlänge für LHD-Instabilitäten zu groß ist, muß angenommen werden, daß es Rayleigh-Taylor-Instabilitäten sind, deren Wellenlänge durch den Plasmawiderstand bestimmt wird. Die Berücksichtigung der sternartigen Gestalt des Plasma-Zylinders ergibt aber lokal eine erheblich größere Stromdichte und damit geringere Stoßfrequenz als der früheren Abschätzung zugrunde lag. Die Abweichung von der klassischen Diffusion ist nicht mehr sehr deutlich, wenn die Sternstruktur berücksichtigt wird.

1.5 Das Vorionisierungsexperiment TORIX

Obwohl im Experiment ISAR II mit einem linearen Theta-Pinch bereits Vorionisierung und schwache Kompression bei niedrigen Dichten ($\rho_0 \geq 3 \mu$) untersucht wurden, war es notwendig, die Untersuchung in einem neuen Experiment fortzusetzen. Der wesentliche Unterschied liegt darin, daß in TORIX ebenso wie später im HBS II mit einem geschlossenen Torus gearbeitet wird ($R_T = 135$ cm, kleiner Gefäßradius $r_{gef} = 8$ cm). Der geschlossene Torus sollte sowohl für die Zündung bei kleinen Dichten als auch für den Verunreinigungsgrad Vorteile bringen.

Das Hauptziel dieses Experiments TORIX liegt darin, hohen Vorionisierungsgrad bei zugleich niedrigem Verunreinigungsgrad zu erreichen und dabei die technischen Daten der Vorionisierung für HBS II festzulegen. Mit einem toroidalen Theta-Pinch kann das vorionisierte Plasma im TORIX nach der Vorionisierung komprimiert werden; ferner können Fragen wie Elektronenheizung und Massenmitnahme in der schnellen Kompression untersucht werden. Vielleicht kann die Lebensdauer durch Überlagerung von toroidalen Strömen so verlängert werden, daß erste Beobachtungen über Verluste (Diffusion, Ladungsaustausch etc.) möglich sein werden.

Nach Abschluß der HBS-Experimente (ISAR T1-B) wurde TORIX aufgebaut und in Betrieb genommen. Erste Ergebnisse zur Sicherstellung einer reproduzierbaren Zündung bei kleinen Dichten (3μ) lagen zum Jahresende bereits vor.

2. Belt-Pinch

(R. Wilhelm, G. Becker, R. Chodura, A. Eberhagen, O. Gruber, H. Herold, H. Krause, S. Lindner, K. F. Mast, F. Söldner, K. H. Steuer, W. G. Wrobel)

Nach einer längeren Umbau- bzw. Anlaufphase konnte im Berichtsjahr am BP IIa wieder ein umfangreicheres experimentelles Programm durchgeführt werden. Die neuen Hochspannungskreise erbrachten eine Verbesserung der Plasmaparameter und des Einschlußverhaltens. Infolge des unerwartet hohen Verunreinigungsgrades in dem neu eingesetzten Gefäß wurden allerdings die erhofften Daten noch nicht ganz erreicht. In Übereinstimmung mit numerischen Transportrechnungen bleibt insbesondere die Elektronentemperatur deutlich unter der Ionentemperatur stehen. Nach Bestimmung der wesentlichen Plasmaparameter und Klärung der Energiebilanz konzentrierten sich die durchgeführten Untersuchungen auf wichtige Detailprobleme des nichtkreisförmigen Hoch- β -Gleichgewichts: vom elliptischen Tokamak ist bekannt, daß das Plasmagewicht mit „realistischer“, d. h. im Zentrum gepeakter Stromdichteverteilung in Richtung Kreisform übergeht. In einer theoretischen Untersuchung wurde versucht, bei Wahl optimaler Querschnittsformen die Grenzen des nicht-kreisförmigen Querschnitts abzustecken. Dabei konnten auch die extrem elongierten Belt-Pinch-Gleichgewichte gefunden und insbesondere experimentell bestimmte Randbedingungen (Felder, Flüsse usw.) bestätigt werden.

Als weiterer wichtiger Programmpunkt sind die Gleichgewichts- und Stabilitätsuntersuchungen bei extrem hohen β_{pol} -Werten zu nennen. Derartige Gleichgewichte haben als „Flux Conserving Tokamak“ jetzt größeres Interesse gefunden, können allerdings im Tokamak mangels Heizung zur Zeit noch nicht realisiert werden. Zusätzliche Schaltungsmaßnahmen am zentralen OH-Kern erlauben, den bisher schon großen β_{pol} -Bereich auf $\beta_{pol} > A$ (Aspektverhältnis) auszudehnen. Die gemessenen Feld- und Druckprofile zeigten dabei große Ähnlichkeit mit den vorliegenden berechneten FCT-Profilen. Auch im Bereich dieser hohen β_{pol} -Werte zeigten sich keine Nachteile im Einschlußverhalten, ein Ergebnis, das Aufmerksamkeit fand.

Am Hochspannung-Belt-Pinch wurden die Untersuchungen der reinen Stoßwellenkompression im Frühjahr 1976 unterbrochen und das Crowbarsystem eingebaut. Dieses System arbeitet jetzt in der erwarteten Weise und liefert erfreulich lange Abfallzeiten für das Magnetfeld. Erste Plasma-Experimente zeigten ein gutes radiales Gleichgewicht, während in axialer Richtung nach typisch 10–20 μ s Verschiebungsinstabilitäten merklich werden. Erste Versuche wurden begonnen, durch Zufügen passiver Multipole axiale Stabilität zu erreichen. Mit Beginn des Jahres 1977 wird dieses Experiment an das IPF Stuttgart gegeben und dort weitergeführt.

Die Untersuchungen zu den Metallwandgefäßen zur schnellen Kompression wurden abgeschlossen. Dabei konnten die zu Überschlägen und damit zur Anwen-

dungsgrenze des Metallgefäßes führenden Einzelprozesse weitgehend geklärt und der noch enge Anwendungsbereich eines Metallgefäßes aufgezeigt werden.

2.1 Belt-Pinch IIa

Beim Belt-Pinch IIa, dem Hauptexperiment der Belt-Pinch-Projektgruppe, werden wegen der technischen Auslegung der Heizbatterie die höchsten Plasmatemperaturen bei Fülldrücken von 1–2 mTorr Deuterium erreicht. Im Berichtsjahr wurden deshalb zunächst Entladungen bei 1.5 mTorr intensiv untersucht.

Durch spektroskopische Messungen stellte sich heraus, daß der Verunreinigungsgrad des Plasmas mit 4% Kohlenstoff und 3% Sauerstoff sehr hoch liegt / 9/. Die durch die Verunreinigungen verursachte Linienstrahlung bewirkt eine schnelle Abkühlung des Plasmas in etwa 50 μ s (siehe Abb. 6). Diese Abkühlung wird

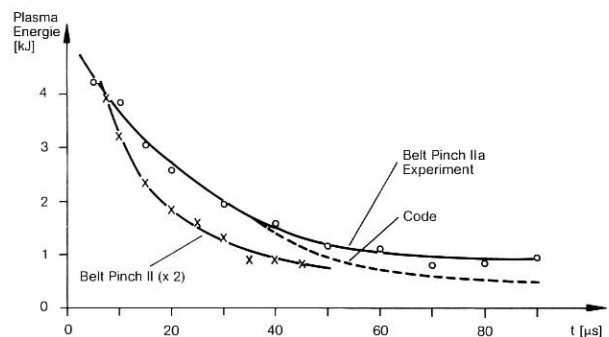


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der Plasmaenergie im Belt-Pinch II (1974), im Belt-Pinch IIa (1976) und in einer Simulationsrechnung für Belt-Pinch IIa

durch einen Transportcode, der alle relevanten klassischen Effekte berücksichtigt, gut erklärt (vergl. Abschnitt 2.2).

Wegen der starken Kühlung der Elektronenkomponente des Plasmas ergeben sich deutlich kleinere Elektronen- als Ionentemperaturen. Aus lokalen Feldmessungen (siehe Abb. 7 und 8) und zusätzlichen

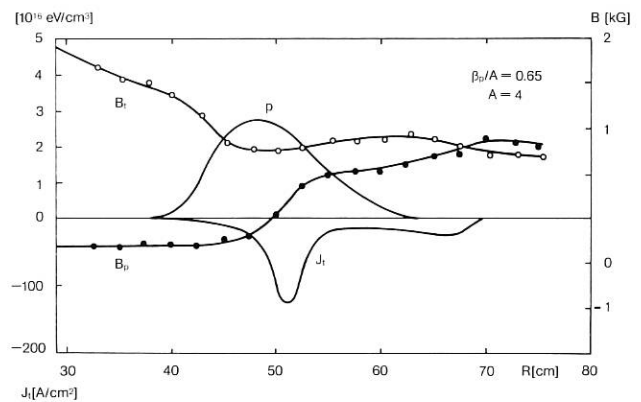


Abb. 7: Gemessene radiale Profile des toroidalen Feldes (B_t), des poloidalen Feldes (B_p) sowie der toroidalen Stromdichte (j_t) und des Plasmadruckes (p) zum Zeitpunkt $t = 9 \mu$ s

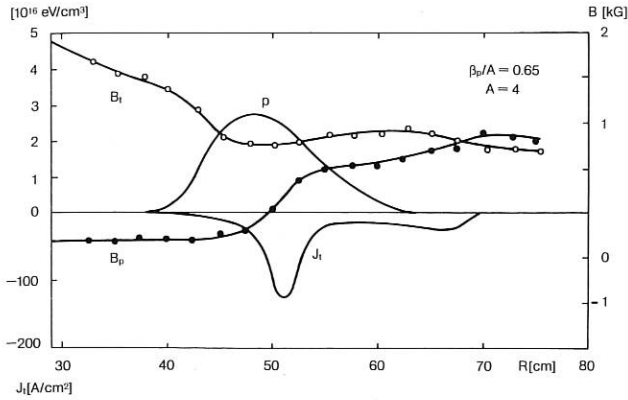


Abb. 8: Gemessene radiale Profile zum Zeitpunkt $t = 12 \mu\text{s}$

Messungen der Elektronendichte mit Hilfe von $3 \mu\text{m}$ -Interferometrie wurde für die Anfangsphase der Entladung die Temperatursumme $kT_e + kT_i$ zu $140\text{--}200 \text{ eV}$ bestimmt. Eine Messung von kT_e durch Laserlichtstreuung ergab nur eine Anfangstemperatur von $kT_e = 22 \text{ eV}$. Den gemessenen zeitlichen Verlauf von kT_e zeigt Abb. 9. Da auch dieses Verhalten der Elektronen-

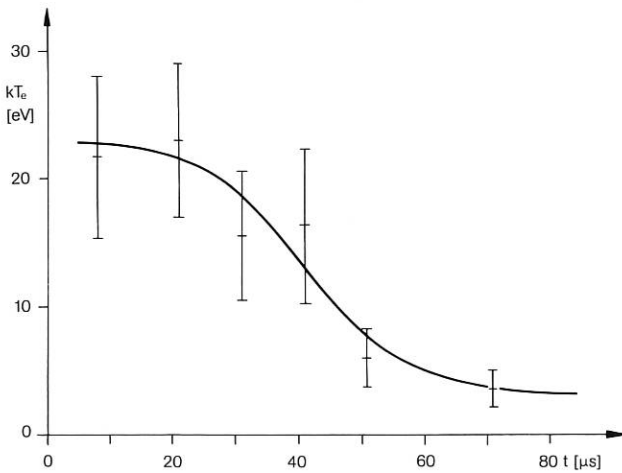


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der Elektronentemperatur gemessen durch Laserlichtstreuung

temperatur durch den Transportcode befriedigend beschrieben wird, darf die Energiebilanz des Plasmas als weitgehend geklärt gelten.

Eine Verlängerung der Energieeinschlußzeit im Belt-Pinch IIa ist praktisch nur durch eine Verringerung des Verunreinigungsgrades möglich. Da es wahrscheinlich ist, daß die Verunreinigungen hauptsächlich aus den Nähten des vielfach verklebten Vakuumgefäßes herauslöset werden, wird angestrebt, den Verunreinigungsgrad durch ein neues Glasgefäß, bei dem die Klebenähte sorgfältig verdeckt sind, zu vermindern. Ein solches Glasgefäß wird zur Zeit hergestellt.

Durch ein enges „Wechselspiel“ zwischen Messungen und numerischen Gleichgewichtsrechnungen (vergl. Abschnitt 2.2) gelang es, die Struktur der experimen-

tellen Belt-Pinch-Gleichgewichte zu klären / 3 /. Dazu war es notwendig, Informationen zu gewinnen sowohl über die Feldverteilung in radialer Richtung, d. h. in Richtung der kleinen Halbachse des elongierten Plasmaquerschnittes, als auch senkrecht dazu, d. h. in axialer Richtung. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen mit Sonden gemessene radiale Feldprofile in der Mittelebene des Torus und die daraus berechneten Strom- und Druckprofile für zwei verschiedene Zeitpunkte. Wegen der Abkühlung des Plasmas erniedrigt sich der Wert des poloidalen Betas (β_p) für den späteren Zeitpunkt. Entsprechend werden die für hohe β_p -Werte von der Theorie vorhergesagten Effekte abgeschwächt, wie z. B. die Versetzung des Maximums der toroidalen Stromdichte j_t gegenüber dem Maximum des Plasmadruckes p in Richtung größerer Radien. Zusätzlich zeigt sich, daß bei geringeren β_p -Werten die schwache negative Stromdichte auf der Plasmaintenseite nicht mehr auftritt.

In axialer Richtung wurde außerhalb des Vakuumgefäßes die axiale Feldkomponente B_z als Funktion von z gemessen. Radiale und axiale Feldmessungen erlauben zusammen zwingende Schlüsse über die Form der Flußflächen im Belt-Pinch (vergl. Abschnitt 2.2).

2.2 Theoretische Untersuchungen

2.2.1 Axialsymmetrische MHD-Gleichgewichte mit nicht kreisförmigen Plasmaquerschnitten

Für axialsymmetrische niedrig- und hoch-beta Plasmen mit elongierten Querschnitten Tokamaks, Belt-Pinche) wurden Existenz und Eigenschaften idealer magneto-hydrostatischer Gleichgewichte mit freier Oberfläche in Multipolanordnungen untersucht. Variiert wurden Plasmaform, toroidale (j_t) und poloidale Stromdichteverteilung im Plasma, Beta (β), poloidales Beta (β_p), Halbachsenverhältnis (b/a), Aspektverhältnis (A), radiales (χ) und axiales Kompressionsverhältnis. Mit zeitlich konstanten äußeren Leiterströmen wurden selbst-konsistente Gleichgewichte mit b/a bis 4 unabhängig von A (3 bis 8) und χ (1,5 bis 4) gefunden / 2 /.

Mit Hilfe eines Programms, das durch Variation der Leiterströme iterativ die Abweichung der Plasmaform von einer vorgeschriebenen Kontur minimalisiert, gelang es, die Existenz von Gleichgewichten mit b/a bis mindestens 16 und χ bis mindestens 4 nachzuweisen. Damit konnten dann experimentelle Gleichgewichte mit b/a zwischen 9 und 14 im Belt-Pinch II*) und Belt-Pinch IIa / 3 / berechnet und geprüft werden. Die Eingabeparameter für die Rechnungen werden so gewählt, daß die Gleichgewichte konsistent mit experimentellen Randbedingungen, gemessenen axialen B_z -Profilen und gemessenen Werten von β und β_p sind. Aufgrund der speziellen Wandgeometrie mit Flußerhaltung außen sind nur Plasmaformen möglich, die einem Racetrack nahekommen. Die zugehörige Struktur des poloidalen Flusses ist charakterisiert durch eine extreme Elongation innerer Flußflächen (s. Abb. 10). Das hat wichtige Konsequenzen für die Stabilität interner Moden. Die be-

*) Wird veröffentlicht in Nuclear Fusion

rechneten Gleichgewichte stimmen in den wesentlichen Eigenschaften mit dem Experiment überein (G. Becker, K. Lackner).

2.2.2 Transportvorgänge in Hoch-Beta-Plasmen

Das Programm zur Simulation von Transportvorgängen in Hoch-Beta-Plasmen mit Neutralgas und Verunreinigungen /1/ wurde auf Belt-Pinch II und Belt-Pinch IIa angewendet. Experimentelle Profile des toroidalen und poloidalen Magnetfelds und des Plasmadrucks nach der Stoßwellenheizung dienen als Anfangsprofile für die Modellrechnungen. Für einen Vergleich mit der Simulation liegt experimentell nur die zeitliche Entwicklung der Plasmaenergie und der Elektronentemperatur vor. Man findet eine sehr gute Übereinstimmung über die gesamte Dauer des Experiments, wenn mit einem Verunreinigungsgrad, der etwa 1,5 bis 2 mal höher als der gemessene Wert liegt, gerechnet wird /9/. Für die vorliegenden Elektronentemperaturen bei 20 eV liefert demnach der numerische Code einen zu kleinen Strahlungsverlust. Das weist darauf hin, daß noch nicht alle für den Strahlungsverlust wichtigen Resonanzlinien berücksichtigt wurden.

Mit einer anderen Version des Programms können jetzt auch Plasmen mit kreiszylindrischer Geometrie bearbeitet werden. Damit wurden Transportstudien für den HSB II durchgeführt. Untersucht wurden u. a. der Neutralgasabbau durch Ionisation und Umladung, die Vorgänge in der Randschicht, die Energieverluste bei verschiedenen Sauerstoff- und Neutralgasanteilen und die kritischen Werte für Verunreinigungsgrad, Neutralgasdichte und Neutralgaszufluß von der Wand (G. Becker).

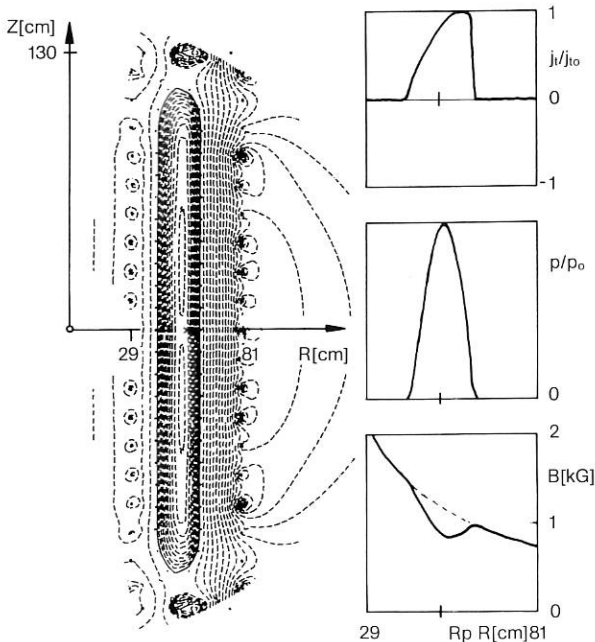


Abb. 10: Berechnetes Gleichgewicht für Belt-Pinch IIa. Die äquidistanten Punkte markieren die experimentelle Leiterfläche

2.3 Hochspannungs-Belt-Pinch

Am Hochspannungs-Belt-Pinch wurde die Untersuchung der Stoßwellenkompression im 1. Halbjahr 1976 abgeschlossen. Nach Einbau eines Crowbarsystems wurden im 2. Halbjahr zusammen mit Mitarbeitern der IPF Stuttgart erste Messungen mit dem auf etwa 50 μsec verlängerten Magnetfeldimpuls durchgeführt. Diese Arbeiten wurden Ende 1976 beendet. Das Experiment wird danach an die Universität Stuttgart transferiert und dort weitergeführt.

Ziel der Untersuchungen in der Implosionsphase war es, festzustellen, wie Stoßfrontbreite, Plasmaheizung und Plasmabeta von der Anfangsdichte abhängen.

Im Dichtebereich $n_{e0} = 10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ wurde ein Übergang festgestellt von einer mehr diffusiv bestimmten Kompression bei kleinen Dichten zu einer deutlichen Trennung zwischen komprimiertem Plasma und magnetischem Kolben bei höheren Dichten. Zwei charakteristische Fälle mit $n_{e0} = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ und $n_{e0} = 7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ wurden genauer untersucht. Im Fall

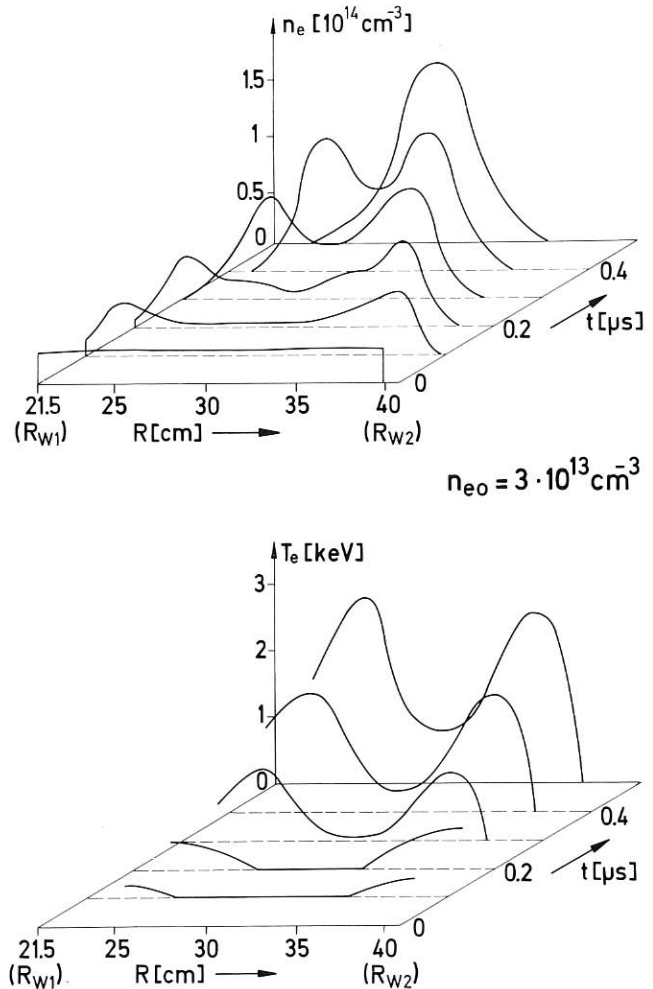


Abb. 11: Zeitliche Entwicklung der radialen Elektronendichte- und -temperaturprofile während und unmittelbar nach der Stoßkompression. Anfangsdichte $n_{e0} = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

der kleineren Anfangsdichte führt anomale Diffusion bereits während der Kompression zu einem Eindringen der diamagnetischen Ströme in den gesamten Plasmabereich. Die zeitliche Entwicklung der radialen Elektronendichte und -temperaturprofile (siehe Abb. 11) wurde mit Hilfe eines Vielkanal-Laserstreusystems gemessen. Die Elektronen werden in der Kompressionsschicht bis zu 3 keV geheizt. Ein Drittel der Ionen wird am magnetischen Kolben reflektiert. Die mittlere Energie der Ionen beträgt nach der Kompression 1.3 keV.

Bei der höheren Anfangsdichte bleibt der zentrale Plasmabereich während der Kompression magnetfeldfrei; die diamagnetischen Ströme fließen nur im Außenbereich und führen auch nur dort zu starker Elektronenheizung. Die Elektronentemperatur steigt bis 1 keV in der Schicht, während sie im Zentralbereich nur 50 eV beträgt. Der Reflexionsgrad der Ionen beträgt 60%. Die Ionen haben nach der Kompression eine mittlere Energie von 1 keV.

Die starke Elektronenheizung im Kolbenbereich ist in beiden Fällen auf stromgetriebene Ionenschall-Instabilitäten zurückzuführen. Die Form der Ionenverteilungsfunktion, die aus spektroskopischen Messungen des D_α -Linienprofils bestimmt wurde, und die Größe der Elektronendriftgeschwindigkeit stehen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der quasilinearen Theorie. Danach wird die Ionenschallinstabilität durch lineare Landaudämpfung an den Ionen begrenzt. *)

Mit einem Flüssigkeit-Teilchen-Hybridcode wurden Simulationsrechnungen für die Daten des Hochspannungs-Belt-Pinches durchgeführt. Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Magnetfeldprofilen ergibt sich, wenn man für die Elektronenheizung und -wärmeleitung senkrecht zum Magnetfeld die gleiche effektive Stoßfrequenz einsetzt. Dies weist auf ein senkrecht zum Magnetfeld weitgehend isotropes Spektrum der Ionenschallwellen hin.

Die experimentellen Ergebnisse und die Parameterstudien zur Stoßwellenkompression am Hochspannungs-Belt-Pinch zeigen eine starke Abhängigkeit der Ionenheizung vom Reflexionsgrad der Ionen. Reflexion setzt oberhalb einer kritischen Anfangsdichte $n_{e0} = 9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ein, bei der die Breite der Kompressionsschicht gerade von der Größe des halben Kompressionsweges ist. Der Reflexionsgrad steigt bis zu 65% bei $n_{e0} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ an. Mit steigendem Reflexionsgrad nimmt die Ionenheizung zu, ebenso das Verhältnis von gesamter Plasmaenergie zur Magnetfeldenergie in der Spule und damit der Wirkungsgrad der Stoßwellenkompression (Abb. 12).

Die Untersuchungen haben ergeben, daß sich durch starke Stoßwellen in toroidaler Geometrie schwach komprimierte Hoch- β -Plasmen mit T_i und T_e im keV-Bereich erzeugen lassen. Bei kleinen Anfangsdichten werden durch anomale Diffusion vorwiegend die Elektronen geheizt; bei höheren Dichten überwiegt die Ionenheizung. Die stärkere Ionenheizung ist auf die zunehmende Reflexion der Ionen am magnetischen Kolben zurückzuführen.

*) Diese Arbeiten wurden gemeinsam mit C. T. Dum (Bereich Theorie) durchgeführt.

2.4 Metallgefäße für Hoch- β -Entladungen

Aus Untersuchungen in den Vorjahren war bekannt, daß die Verwendbarkeit von geschlitzten Metallgefäßen in schnellen magnetischen Kompressionsexperimenten zumindest dann eine Grenze findet, wenn bei entsprechend hohen induzierten elektrischen Feldern Kurzschlußüberschläge über die Schlitze auftreten und einen weiteren Aufbau des treibenden Magnetfeldkolbens im Gefäßinnern verhindern. Die gegenseitige Abhängigkeit von maximal zulässiger elektrischer Feldstärke und Fülldruck (mit Schlitzbreite, Wandmaterial usw. als Parameter) war ermittelt worden, und es lagen Hinweise dafür vor, daß die Verwendung geschlitzter Metallgefäße mit zunehmendem Gefäßdurchmesser schwieriger wird.

In einer Reihe von anschließenden Untersuchungen an einem 15 kJoule Theta Pinch mit vierfach geschlitztem Entladungsgefäß von 40 cm Durchmesser konnten nun zunächst die an der Entstehung der Kurzschlußüberschläge dominierend beteiligten Prozesse aufgezeigt werden. Danach spielt dabei lokal verdampftes Anodenmaterial – erzeugt und anschließend ionisiert durch Elektronen aus der Kathodenseite des Schlitzes –, eine wesentliche Rolle. Dieses ließ sich stützen sowohl durch Verwendung verschiedener Füllgase und durch Untersuchungen der Oberflächenstruktur auf beiden Elektrodenseiten des Schlitzes als auch und vor allem durch die Ermittlung der zur Vermeidung von Kurzschlußüberschlägen erforderlichen, parallel zum Schlitz zusätzlich zu überlagernden, quasistationären Magnetfelder. Sie entsprachen genau den Werten, oberhalb

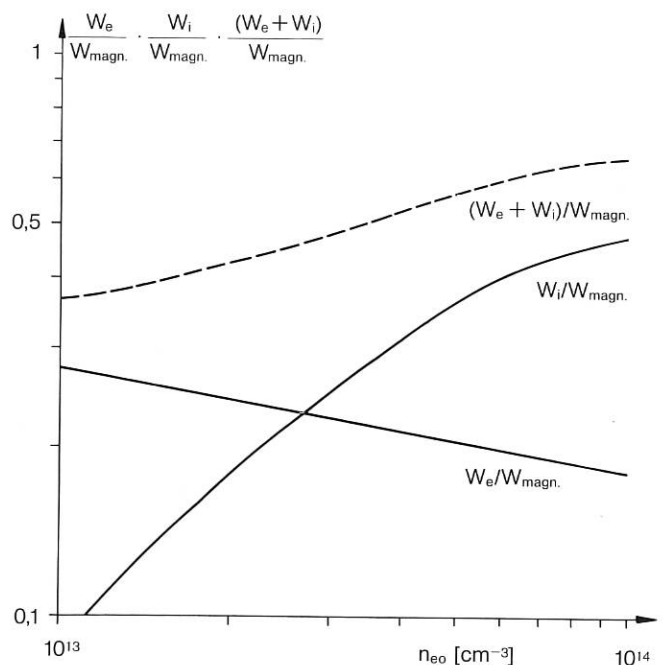


Abb. 12: Dichteskalierung der Elektronen- und Ionenenergien nach Ende der Stoßwellenkompression
 W_e/W_{magn} = Gesamtenergie der Elektronen / gesamte magnetische Energie in der Spule
 W_i = Gesamtenergie der Ionen

deren die aus der Kathode stammenden Elektronen noch vor der gegenüberliegenden Anode umgelenkt werden.

Mit Hilfe eines speziell entwickelten Magnetfeldsondenpaares gelang es ferner, den in der Metallwand während der Entladung fließenden Strom zu messen. Damit und in Verbindung mit Rechnungen zur Potentialverteilung im Metallgefäß konnte nachgewiesen werden, daß die Schlitze des Metallgefäßes bereits vor dem Auftreten von Kurzschlußüberschlägen durch radiale Flächenströme zwischen Plasma und Metallwand überbrückt werden. Über diese Strombrücken fließt bis zu 30% des insgesamt induzierten Plasmastromes und geht dadurch für die Plasmakompression verloren. Gleichzeitig konnte jedoch auch gezeigt werden, daß bei genügendem Herabsetzen der Plasmafähigkeit vor der Metallwand – z.B. wiederum durch überlagerte, quasistationäre Magnetfelder – derartige Plasmabrücken vermieden werden können. Daß solche überlagerten Magnetfelder andererseits aber eine Beschränkung der durch die Plasmakompression erreichbaren Plasma- β - und -temperaturwerte bedeuten, war bereits im Jahresbericht 1975 ausgeführt worden.

Aus zeitaufgelösten Messungen der radialen Magnetfeldverteilung im Entladungsgefäß ließ sich schließlich auch nachweisen, daß sich die azimutale Verteilung des Kompressionfeldes entlang der inneren Metallwand gemäß der zu erwartenden Diffusionszeit für das Magnetfeld verzögert. Um die sich daraus ergebenden Inhomogenitäten des treibenden Magnetfeldes klein genug zu halten, muß bei schnellen Kompressionsentladungen in einem Metallgefäß die Stegbreite auf die Größenordnung cm beschränkt bleiben.

Zusammenfassend ergaben die nunmehr abgeschlossenen Untersuchungen, daß sich mit Hilfe der schnellen magnetischen Stoßwellenheizung in geschlitzten Metallgefäßen nur Plasmen bis zum mittleren Energiebereich (wenige 100 eV) erzeugen lassen, wenn man nicht technologische Schwierigkeiten mit extrem zahlreich geschlitzten Gefäßen eingehen will. Diese Beschränkung ergibt sich wegen der entweder zusätzlich zu überlagernden Magnetfelder zur Verhinderung von Kurzschlußüberschlägen und Plasmabrücken über die Schlitze oder wegen der alternativen Forderung von nicht zu großen Gefäßdurchmessern. Im letzteren Fall sind Stoßwellenentladungen unterhalb eines entsprechenden Fülldruckes nicht mehr durchführbar, wodurch die erreichbaren Plasmatemperaturen nach oben hin beschränkt bleiben.

3. Diagnostik im Bereich Hoch-Beta-Plasmen

(H. Röhr, U. Fahrbach, P. Forman¹), H. Langer, K.-H. Steuer, W.-G. Wrobel)

Die Thomson-Streuung bei sehr hohem Falschlichtanteil, wie er an HBS II zu erwarten ist, wurde dahingehend verbessert, daß der relativ lichtschwache Dreigitter-

polychromator (IPP 1/157) durch Interferenzfilter mit steilen Flanken ersetzt wurde. Zwei hintereinander montierte 4-Perioden-Filter schwächen das Falschlicht auf 10^{-6} ab, während die Transmission für das Nutzlicht noch 30% beträgt. Am Belt-Pinch IIa konnte diese lichtstarke Filterkombination erfolgreich erprobt werden, wobei auf ein Beugungsgitter völlig verzichtet wurde.

Im Zusammenhang mit der Falschlichtabschwächung im Beobachtungsteil der Streuexperimente war es notwendig, ein der Propanstreuung vergleichbares Eichverfahren für die Elektronendichte zu entwickeln. Ramanstreuung an SF_6 bietet dafür die Möglichkeit. Die stärkste Ramanlinie ist um 775 cm^{-1} gegenüber dem eingestrahlichten Licht verschoben ($6943\text{ \AA} \rightarrow 7338\text{ \AA}$) und der Streuquerschnitt, der von uns gemessen wurde, ist so, daß die Streuung von 540 Torr SF_6 der von 10^{14} cm^{-3} Elektronen äquivalent ist. Das SF_6 -Molekül ist sehr symmetrisch gebaut, so daß Dipolkräfte und damit Verunreinigung der Gefäßwände klein sein sollten.

Als Vorstufe für ein Mehrkanalinterferometer bei $340\text{ }\mu\text{m}$ wurde ein transversal gepumpter HCN-Laser gebaut. Damit soll zunächst an ISART I die Transmission des mit Plasma gefüllten Gefäßes untersucht werden, weil bei früheren Messungen an ISAR III²⁾ ungeklärte Absorptions- oder Strahlablenkungseffekte beobachtet wurden. Der Ausgang dieser Untersuchung entscheidet, ob ein Mehrkanalinterferometer gebaut wird.

Über die direkt projektgebundene Diagnostik hinausgehend wurde der Komplex Resonanz- und fast resonante Rayleighstreuung zum Zwecke des Neutralteilchennachweises in Plasmen weiter bearbeitet. Die bereits im Vorjahr durchgeführten Streuexperimente mit abstimmbaren Farbstofflasern wurden mit einem $H\alpha$ -Laser an einem Wasserstoffplasma fortgesetzt.

In diesem Experiment war es möglich, das Sättigungsverhalten der Resonanzstreuung quantitativ zu verfolgen. Da der Laser nur einige kW emittierte, konnte leider die Rayleighstreuung nicht beobachtet werden. Es liegt jedoch bereits ein neuentwickelter Farbstoff vor, der es gestattet, Leistungen im MW-Bereich bei $H\alpha$ zu erzeugen und damit die Dichte der angeregten Wasserstoffatome und deren Temperatur mittels der Rayleighstreuung zu messen. Für die Messung der Wasserstoffatome im Grundzustand ist jedoch eine Lichtquelle mit Lyman-Strahlung im Vakuum-UV erforderlich. Mit dem Ziel, eine intensive Quelle für Lyman- α -Strahlung zu entwickeln, wurde ein Farbstofflaser mit der Wellenlänge 7296 \AA ($6 \times Ly\ \alpha$) möglichst hoher Leuchtdichte gebaut. Diese Strahlung soll frequenzverdoppelt und anschließend verdreifacht werden. Der Laser besteht aus einem Oszillator mit frequenzselektiven Elementen, die eine Linienbreite von ca. $0,1\text{ \AA}$ ermöglichen, und mehreren Verstärkerstufen, die alle von einem Rubinlaser gepumpt werden. Die Leistung soll 50 MW betragen. Bisher wurden Impulse von $\leq 10\text{ MW}$ gemessen.

¹⁾ Gast aus Los Alamos

²⁾ Jahresbericht 1971, S. 9

Bereich **Niedrig-Beta-Stellaratoren**

(Dr. Günter Grieger – abgeordnet zur Kommission der EG)
(Dr. Gerhart von Gierke – kommissarisch)

Im Berichtszeitraum 1976 konnte der technische Aufbau des Stellarators WENDELSTEIN VII A vollendet und der experimentelle Betrieb aufgenommen werden. Die erste Phase bestand in der Optimierung der Vorionisierungsmethoden und der 50-Hz-Reinigungsentladung. Eine Kombination von Plasmagun und UKW-Sender (106 MHz) erwies sich bisher als die geeignetste Vorionisierungsmethode. Ebenso hat auch die vom W II B übernommene Methode der Reinigungsentladung mit 50 Hz im stationären Betrieb seine Wirksamkeit erwiesen.

Der Mitte des Jahres aufgenommene Pulsbetrieb erfolgte bis auf die Explosion eines ölgekühlten mechanischen Schalters im OH-Kreis ohne größere technische Schwierigkeiten. Die Hauptkomponente des OH-Schaltkreises – der vom IPP in Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig entwickelte Drahtexplosionsschalter – arbeitete zufriedenstellend; die Probleme lagen hauptsächlich in der Abnutzung der mechanischen Zusatzschalter. Inzwischen wurde der Explosionsschalter durch den von der Firma Hughes gelieferten Quecksilberdampfschalter ersetzt. Bei einem Magnetfeld von 2.5 T konnten im Pulsbetrieb Entladungszeiten bis zu 250 ms erreicht werden. Technische Verbesserungen im OH-Kreis erlauben jetzt eine Regelung und damit zeitlich konstante Plasmaströme bis zu 400 ms Dauer.

Die erste Experimentierphase erbrachte Plasmaparameter, wie sie nach der pseudoklassischen Skalierung zu erwarten waren. Mit Energieeinschlußzeiten von 2–8 ms lagen diese Werte bis zu einem Faktor 20 über den von der Bohm-Skalierung erwarteten Werten; ebenso konnte der vom Tokamak bekannte Anstieg der Einschlußzeit mit der Dichte bestätigt werden. Die Temperatur- und Dichteprofile zeigen eine starke Verbreiterung im Zentrum der Entladung, welche wahrscheinlich auf die innerhalb der $q = 1$ -Fläche auftretenden Sägezahnoscillationen zurückzuführen ist.

Im Verhalten gegenüber der Abbruchinstabilität zeigt sich ein starker stabilisierender Einfluß des Stellaratorfeldes. Die Entladungen konnten dadurch unterhalb $q(a) = 2$ stabil betrieben werden; außerdem zeigte sich bisher in Entladungen mit erhöhter Gaszufuhr kein Dichtelimit. Diese günstigen Ergebnisse berechtigen zu einer Fortführung der Experimente mit erhöhtem Magnetfeld und erhöhten Heizströmen, um durch Ausschöpfen des vollen Parameterbereichs am W VII A mehr Aufschluß über das Einschluß- und Stabilitätsverhalten einer Ohmsch geheizten Entladung zu erhalten.

Die Arbeiten an einem W VII B-Gefäß wurden bis Mitte des Jahres 1976 fortgeführt und das Konzept eines W VII B-Torus mit modularer Helix weiter entwickelt. Die Fortführung dieser Aktivitäten wurde jedoch zunächst zurückgestellt.

Das vom IPP Garching und der CEA Grenoble zusammen mit ERM Brüssel gemeinsam durchgeführte Experiment WEGA wird zur Zeit als Tokamak betrieben, da bisher das Torusgefäß mit Helix nicht geliefert werden konnte. Die Einkopplung einer HF-Leistung bis zu 100 kW im Lower-Hybrid-Frequenzbereich führte zu einer Erhöhung der Ionentemperatur um 20–30%. Durch Modifikation der Antennenstruktur konnte die Einkopplung verbessert und damit die Ionentemperatur um 60% auf etwa 240 eV erhöht werden. Eine Fortführung dieser Versuche mit doppelter Heizleistung ist vorgesehen.

1. Stellarator W VII A

W VII A-Team (H. Wobig, H. Renner, M. Blaumoser*), J. Sapper, G. Cattanei, A. Cavallo**), D. Dorst, A. Elsner, H. Hacker, H. Jäckel, R. Jaenicke, J. Junker, M. Kick, E. van Mark***), R.-C. Kunze, F. Leuterer, S. Marlier, G. Müller, A. van Oordt, F. Rau, S. Rehker, H. Ringler, J. Saffert, P. Smeulders, M. Tutter, A. Weller, E. Würsching, M. Zippe)

Im Laufe des Jahres 1976 erfolgten die wesentlichen Phasen der Inbetriebnahme des W VII A. Nachdem mit der 50-Hz-Entladung zur Reinigung des Vakuumgefäßes bereits Anfang April begonnen war, wurden die ersten Pulsentladungen Mitte Mai durchgeführt. Die Phase der Inbetriebnahme war gekennzeichnet durch die Optimierung des Entladungsablaufes und der Startbedingungen. Der eigentliche Meßbetrieb mit den wesentlichen diagnostischen Einrichtungen wie Laserdiagnostik, Röntgenstrahldiagnostik, Neutralteilchenanalyse, Spektroskopie und Mikrowelleninterferometrie begann Anfang August und erstreckte sich bis zum Oktober. Insgesamt wurden etwa 3000 Entladungen gezündet und ausgewertet; besonderer Wert lag dabei auf einem Vergleich zwischen Stellarator- und Tokamak-Betrieb. Bei einem Magnetfeld von 2.5 T und verschiedenen Werten des Stellaratorfeldes konnten Entladungszeiten bis zu 250 ms erreicht werden. Die Plasmaparameter ($T_e \leq 800$ eV, $n_e \leq 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) liegen im Bereich der Werte, die nach der von W II B und Uragan gefundenen Skalierung vorausgesagt wurden.

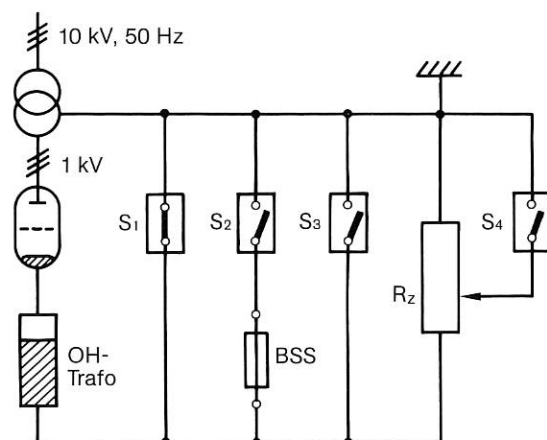
Im folgenden sollen die Erfahrungen mit den technischen Komponenten des Experiments und die Ergebnisse beschrieben werden.

1. Aufbau des Experiments und technische Tests

Im Januar 1976 konnten die Spule 1 E des OH-Systems sowie die restlichen Spulen des Poloidalfeldsystems und die Stromzuführungen fertig montiert werden. Die zur Reinigungsentladung notwendige 50-Hz-Versorgung (150 kVA, 7 kV) wurde ebenfalls aufgebaut.

Während des anschließenden Strom- und Spannungstests des Poloidalfeldsystems zeigte sich, daß die auftretenden Verschiebungstrome oberhalb 40 kV an den Spulenoberflächen zu teilweise erheblichen Gleitentladungen führten. Die Spulen wurden deshalb nachträglich mit Erdbelägen versehen, welche verhindern, daß Entladungen in Diagnostikeinrichtungen bzw. Meßleitungen stattfinden können. Die vom Streufeld des OH-Trafos auf die Zuleitung wirkenden starken Umbruchkräfte machten den zusätzlichen Einbau einer Abstützung erforderlich. Der Aufbau der Apparatur wurde mit dem Test des Kommutierungswiderstandes des Helixshunts (Pulsstrom 36 kA, Prüfspannung 7.6 kV) und der Installation des Drahtexplosionsschalters (Abb. 1) beendet. Die für den Anfangsbetrieb ausgetesteten und vorgesehenen Parameter waren:

Hauptfeld	30 kA	3,4 kV
Hauptfeld mit Helix	25 kA	1,6 kV
OH-System	15 kA	20 kV
	begrenzt durch Drahtexplosionsschalter	
Bz-Feldsystem	6 kA	30 kV



S₁ Abbrandschalter, Öffner
 S₂, S₃, S₄ Schnelle Zuschalter
 R_z Zusatzwiderstand
 BSS Drahtexplosionsschalter

Abb. 1: Schaltbild des OH-Trafoschaltkreises

*) Zur Zeit PPL Princeton, N.J. (USA)

**) Gast von der Univ. Madison, Wisc. (USA)

***) Bis September 1976

2. Inbetriebnahme

Im Februar konnte das Toroidfeld des Experiments für die thermische Abnahme des 1,45 GJ Generators zur Verfügung gestellt werden. Im Dauerpulsbetrieb wurden hierbei innerhalb von 2,5 h ca. 80 Pulse mit 30 kA gefahren und alle Anlagenteile bis annähernd Beharrungstemperatur erwärmt.

Bei der Inbetriebnahme der Reinigungsentladung (März 1976) zeigte sich, daß die Verlustleistung im OH-Transformator erheblich über den vorausberechneten Werten lag und die diesbezügliche Einspeisung neu angepaßt werden mußte. Die Reinigungsentladung konnte so ab Mitte Mai 1976 mit erhöhter Leistung betrieben werden. Die Verluste konnten rechnerisch in Form von Stromverdrängungsverlusten im Wickelkupfer der zentralen Spulen des OH/Vertikalfeldsystems nachgewiesen werden. Erste thermische Messungen zeigten die Richtigkeit dieser Berechnung.

Die im Aluminiumgerüst des Hallenbodens induzierten Ströme verzerrten das Feld des OH-Trafos erheblich. Durch Isolation der Verbindungsstellen konnte diese Störung auf ein tolerables Maß reduziert werden.

Die Aufnahme des Pulsbetriebes (17. 5. 76) mit Hilfe des Drahtexplosionsschalters erfolgte ohne größere Komplikationen. Es ergab sich aber die Notwendigkeit, die durch das Auftreten der Abbruchinstabilität an den Helixhälften induzierten Spannungen durch ein Sicherungssystem auf 1 kV zu begrenzen.

Am 2. Juli explodierte während des Schaltvorganges die mit Öl als Löschmittel betriebene Schaltkammer des Schalters S 1 der Kommutierungseinrichtung. Die Rekonstruktion des Vorganges hat ergeben, daß wegen unerwartet hohen Abbrandes des Schaltstiftes aller Wahrscheinlichkeit nach das Löschmittel bereits in der Aufladephase des OH-Transformators (in welcher dieser Schalter geschlossen ist) eine unzulässig hohe Energiemenge aufgenommen hatte. Der nachfolgende Schaltlichtbogen hat dann zu einem unzulässig hohen Gasdruck in der Schaltkammer geführt. Es muß aufgrund der Zerstörungen angenommen werden, daß ein erheblicher Teil der Explosionsenergie aus dem Löschmittel stammte (Crack-Prozeß). Zur Fortsetzung des Betriebes wurde der Schalter deshalb in modifizierter Form mit Wasser als Löschmittel wieder aufgebaut. Seitdem wird der Schalter mit zusätzlicher Überwachung und erhöhten Sicherheitsmaßnahmen betrieben.

Ferner hat sich gezeigt, daß der Kommutierungswiderstand im OH-Kreis zur optimalen Ausnutzung des OH-Trafo-Flußhubes zweckmäßigerweise plasmastromabhängig umgeschaltet wird. Der hierfür erforderliche nahezu „laufzeitlose“ Zuschalter (Nenn Daten: 15 kA, 10 kV) wurde durch ein Ignitron und einen schnellen mechanischen Zuschalter realisiert.

Eine Messung der Wechselwirkung zwischen Hauptfeld und Vertikalfeld bezüglich der auf das Traggerüst ausgeübten Kräfte ergab bei 30 kA Hauptfeldstrom und 1,5 kA Vertikalfeldstrom die erwartete und vorausberechnete Verdrehung von ca. 1,0 mm zwischen dem oberen und dem unteren Tragrings. Ebenso verhielten sich alle Bauteile, welche die Kippkräfte der Haupt-

feldspulen aufnehmen, einwandfrei. Nach Ende der Betriebsphase wurde im Oktober ein weiterer Verformungstest der Hauptfeldspulen bei 30 kA durchgeführt. Die Meßwerte lassen den Schluß zu, daß durch die bisher durchgeführten rund 3000 Pulse im Hauptfeldsystem keine Alterung der Spulen erfolgt ist.

Ebenso wurde der Isolationszustand aller Systeme in regelmäßigen Zeitabschnitten überprüft, wobei 70 bis 80% der Neu-Prüfspannung angelegt werden. Eine Verschlechterung der Isolationsgüte konnte nicht festgestellt werden. Eine Erhöhung der Betriebsparameter des Experiments kann deshalb schrittweise zusammen mit der Wiederaufnahme des Betriebs im Frühjahr 1977 erfolgen.

3. Diagnostik

Die umfangreichen diagnostischen Einrichtungen, die in Betrieb gebracht wurden und Ergebnisse lieferten, sollen in der folgenden Übersicht gegeben werden:

- | | | |
|-----|---|-------------------------|
| 3.1 | Elektrische, magnetische Messungen | |
| | Plasmastrom I_p | } P_{OH} Heizleistung |
| | Heizspannung U | |
| | Lage des Stromkanals, vertikale horizontale Verschiebung | |
| | Diamagnetismus (Plasmaenergie W , Energiedichte nKT) | |
| | Messung des Poloidalfeldes B_θ | |
| 3.2 | Plasmadichte und Plasmatemperatur | |
| | μ -Welleninterferometer | $\int n_e(t) dt$ |
| | 2, 4, 8 mm (5 Kanäle) | |
| | Thomsonstreuung mit Rubinlaserlicht | $n_e(r, t)$ |
| | | $kT_e(r, t)$ |
| | Neutralenergieanalysator | $kT_i(t)$ |
| | weiche Röntgenstrahlung | $kT_e(t)$ |
| | Pulshöhenanalyse, Filtermethode | |
| | Bolometer | |
| | Langmuirsonden | Energiefluß |
| 3.3 | Verunreinigungen | |
| | VUV Spektroskopie | |
| | normal | Konzentration |
| | grazing incidence | Strahlung |
| | Röntgenspektroskopie | Konzentration runaway |
| 3.4 | Kollektive Phänomene, Fluktuationen | |
| | B_θ -Spulen | |
| | Messung der weichen Röntgenstrahlung mit Diodenanordnung | Modenanalyse |
| | HF-Sonden, Spektralanalyse | |
| | Limiterbeobachtung | |
| | Messung der „floating“ Potentiale | |

Das Rechnersystem PDP 11/45 wurde zur Datenaufnahme benutzt. Ähnlich wie am W II B wird ein erweitertes RESI-Programm mit der Auswertung der elektrischen und magnetischen Information zur Darstellung der Energiebilanz verwendet. Eine Auswertung der Daten der Laserstreuung, der μ -Welleninterferometrie, der Röntgen- und Neutralenergieanalyse über den Rechner wurde vorbereitet.

Als Ergänzung der beschriebenen Meßverfahren wurden Systeme (Interferometer, Superheterodynempfänger) zur Aufnahme der Synchrotronstrahlung entwickelt. Die Arbeiten am PULSATOR zur Messung des Poloidalfeldes mit der Li-Strahltechnik wurden unterstützt, um im Erfolgsfall das System für den W VII zu adaptieren und so die wichtige Information über die Stromdichteverteilung zu gewinnen.

4. Betriebsablauf - Parameterbereich

Vor dem Pulsbetrieb wird das Entladungsgefäß bei $B_0 = 0.4$ T quasistationär durch 50 Hz Reinigungsentladungen über 2-3 h mit einer Plasmaleistung von ca. 5-10 kW mit Ne als Füllgas vorbereitet. Die Entladung wird bei einem Wasserstoffdruck von $5 \cdot 10^{-5}$ bis $4 \cdot 10^{-4}$ torr durch Vorionisation mittels Ti/H₂ gun und HF (100 MHz/3 kW) gestartet. Mit dem verfügbaren Transformatorfluß von 1.2 Vs wird mit Ohmscher Heizung unter vorprogrammierter Ringspannung eine Entladungsdauer von 0.3 s erreicht.

In der ersten Betriebsphase war aus technischen Gründen das Magnetfeld auf $B_0 = 2.5$ T (4 T 1977) begrenzt. Die externe Rotationstransformation $\frac{1}{2\pi}^*$ konnte zwischen den Werten 0 und 0.23 variiert werden.

Wegen der geringen Kopplung zwischen Primärkreis des Transformators und Plasmastrom und wegen der Nichtverfügbarkeit eines Primärstromreglers ergeben sich starke Beschränkungen in der zeitlichen Führung des Plasmastroms. Quasistationäre Bedingungen konnten nur annähernd erreicht werden.

Durch Vorprogrammierung wird versucht, für das Vertikalfeld B_z einen plasmastromproportionalen Verlauf zu erreichen. Im Stellaratorfall ist allerdings wegen des Gleichgewichtes im helikalen Feld die Anpassung an den Plasmastromverlauf nicht kritisch.

Als sehr nützlich für eine Einflußnahme auf den Plasmastromverlauf erwies sich das Gaseinlaßsystem.

Mit einer Kombination von schnellen mechanischen Ventilen und flußsteuerbaren piezoelektrischen Ventilen war der Gasfluß zwischen 10^{17} - 10^{21} Teilchen/s variierbar. Zusätzlicher programmierter Gasfluß während der Entladungsdauer war zudem nötig, um die Plasmadichte zu halten oder anzuheben.

Bei $B_0 = 2.5$ T wurden hauptsächlich Entladungen bei zwei verschiedenen Werten der externen Rotations-
transformation $\iota_0 = .055$, $\iota_p \gg \iota_0$ („Tokamak“) und $\iota_0 = .23$, $\iota_p \leq \iota_0$ („Stellarator“) untersucht. In Abb. 2 sind

*) $\frac{1}{2\pi} = 1 : q$ wird im folgenden durch ι ersetzt.

$B_0 = 2.5$ T
 $\iota_0 = .23$

3374-3376

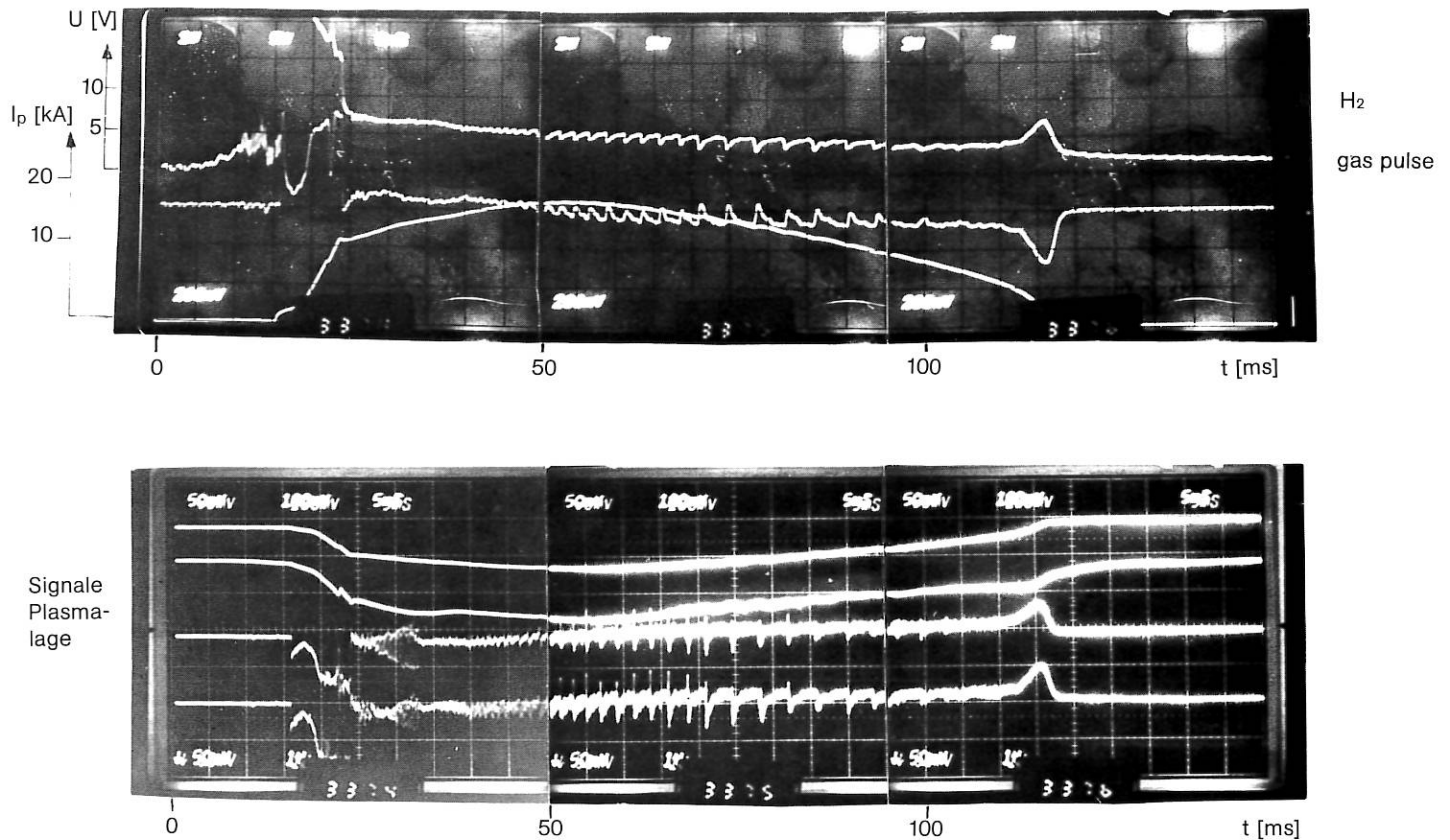


Abb. 2a: Entladung mit $\iota_0 = 0.23$

zwei typische Entladungen mit gleicher Plasmaenergie für diese beiden ι_0 -Werte vereinigt. Dargestellt sind der Plasmastrom, die Ringspannung, Signale von B_θ -Spulen und Rohdaten für die Lageerfassung. Dazu ergaben sich folgende Plasmaparameter:

$$\begin{aligned} \bar{n}_e &= 5 \cdot 10^{18} - 6 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3} \\ k T_e &= 200-900 \text{ eV} \\ k T_i &= 100-220 \text{ eV} \\ Z_{\text{eff}} &= 1.2-8 \\ U &= 3-8 \text{ V} \end{aligned}$$

Mit den erzielten Plasmaparametern liegt man im „intermediate regime“. Zu hohen Dichtewerten gehören niedrige Temperatur und auch niedrige Z_{eff} -Werte, so daß die Stoßfrequenz nicht stark variiert. Bei einem effektiven Plasmaradius $a=0.1 \text{ m}$ wurde bei 2.5 T Hauptfeld ein Maximalstrom von 37 kA (Kruskalstrom 62.5 kA) induziert. Für eine externe Rotationstransformation $\iota_0 = .23$ wurde damit ein Randwert der Rotationstransformation von $\iota = 0.8$ ($q=1.2$ erreicht).

5. Ergebnisse

5.1 Energieeinschluß

Bei der Darstellung des Energieeinschlußverhaltens $\tau_E' = W/P_{\text{OH}}$ (W = Plasmaenergie, P_{OH} = Heizleistung) werden die Ergebnisse aus Messungen mit der diamagnetischen Spule und aus Thomsonstreuungsmessungen miteinander verglichen. Unter zusätzlicher Berücksichtigung von kT_i stimmen die diamagnetischen Energiewerte W gut überein mit den Integralwerten der Elektronenenergie aus den gemessenen n_e - und T_e -Profilen.

In Abb. 3 werden die Spitzenwerte für Dichte und Elektronentemperatur im zeitlichen Verlauf einer Entladung für $B_0 = 2.5 \text{ T}$, $\iota_0 = .23$ wiedergegeben. Betrachtet man $n_e kT_e$ in Relation zum Plasmastrom I_p , so ist eine Reduktion der Energiedichte nkT bei den

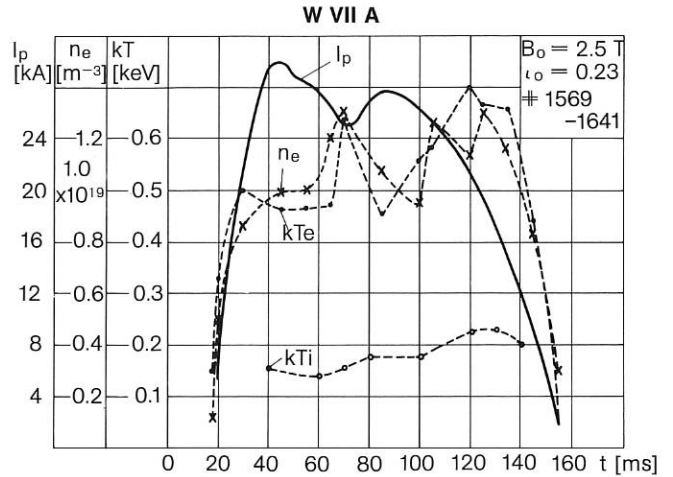


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf von I_p , n_e , T_e und T_i einer Entladung ohne Gaspuls

3046-3053

$B_0 = 2.5 \text{ T}$
 $\iota_0 = 0.055$

H₂ gas pulse

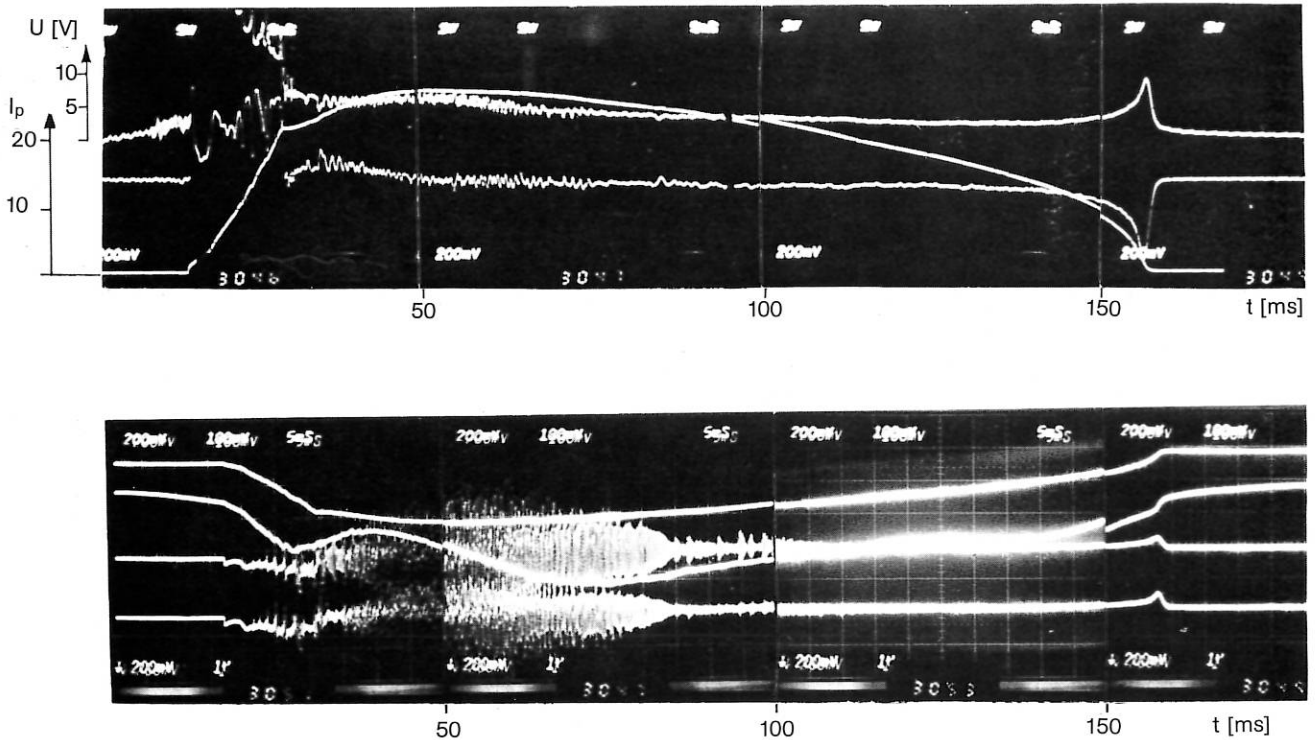


Abb. 2b: Entladung mit $\iota_0 = 0.055$

Spitzenströmen erkennbar. In Abb. 4 sind folgend der Skalierung $nkT = A \iota_p \cdot B_0$ die Gesamtenergie W gegen $(\iota_0 + \iota_p) \iota_p$ für $B_0 = 2.5$ T und zwei verschiedene ι_0 -Werte: $\iota_0 = 0.055$, $\iota_0 = .23$ gegeben. Zwei Typen von Entladungen sind charakterisiert: # 1562, # 1971 mit stationärem Gaseinfluß und # 2703, # 3122, # 3283 mit zusätzlichem gepulsten Gasfluß zu Erhöhung der Plasmadichte. Daraus lassen sich folgende Aussagen ableiten:

1. Für niedrige ι_p folgt die Plasmaenergie der gegebenen Skalierung. Die gleiche Plasmaenergie wird im „Stellarator“-Betrieb bei niedrigerem Heizstrom erreicht.
2. Mit ansteigender Dichte erhöht sich für gleiches ι_p die Plasmaenergie. Für $\iota_0 = .055$ ist mit $n = 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ die maximale Dichte erreicht. Höherer Gasfluß führt zu Stromabbrüchen. Im Fall $\iota_0 = .23$ wird keine derartige Dichtebeschränkung gefunden.
3. Es gibt einen optimalen Wert ι_p mit maximaler Plasmaenergie W . Für $\iota_0 = .055$ („Tokamak“) setzt ein Rückgang von W bei Annäherung an $\iota = 0.5$ ($q = 2$) ein. $\iota = 0.5$ kann nicht überschritten werden. Für $\iota_0 = .23$ („Stellarator“) steigt die Plasmaenergie bei Werten von ι bis zu $\iota = 0.7$.
4. Die Stromdichte erscheint auf den Wert $j = j_{\max} (1 - \iota_0)$ mit $j (\iota = 1) = j_{\max}$ begrenzt und sinkt mit zunehmendem ι_0 .
5. Der anomale Transport innerhalb der $q = 1$ -Fläche und die Zunahme der MHD-Aktivität führen bei hohen Stromwerten wieder zu einem Absinken der Plasmaenergie. Dies ergibt ein Abflachen der Profile im Zentrum und einen steileren Gradienten am Rande. Wie aus dem Vergleich der B_θ -Signale für die beiden Entladungen in Abb. 2 zu erkennen ist, hängt der zeitliche Verlauf von B_θ stark von ι_0 ab.

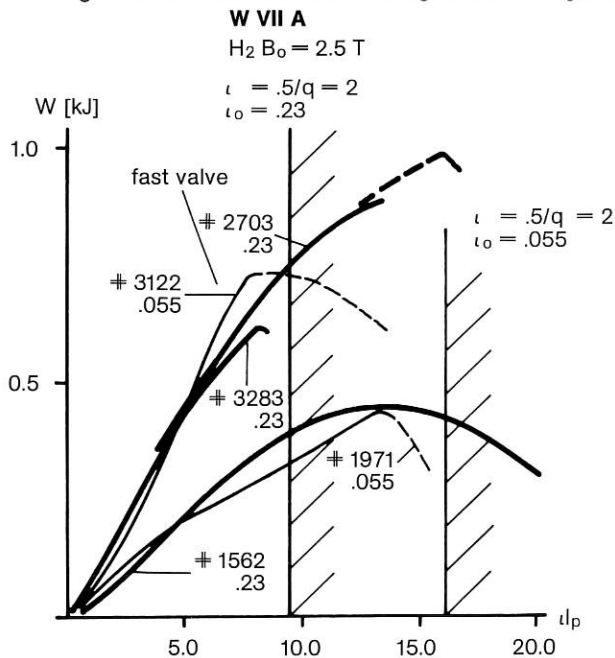


Abb. 4: Gesamtenergie als Funktion von ι_p . Untere Kurve mit stationärer Gaszufuhr, obere Kurve mit Gaspulsen zur Erhöhung der Dichte.

Die gemessenen Werte für den Gesamtenergieeinschluß liegen bei 2–8 ms. Für die Elektronenenergie ergeben sich Einschlußzeiten von 1–7 ms. Bemerkenswert ist, daß sich bei hoher Plasmadichte die Ionentemperatur der Elektronentemperatur nähert. Als Beispiel sind in Tab. 1 Parameter im Vergleich „Stellarator“/„Tokamak“ bei annähernd gleichen Plasmaströmen gegeben. Für die zweite Gruppe wird zusätzlicher Gasfluß mit dem Gaseinlaßsystem angewandt.

Für die Angabe der Skalierung sind die Messungen noch nicht ausreichend. Es fehlen Messungen mit variiertem Hauptfeld. Aber eine Verbesserung des Einschusses mit steigender Dichte und Temperatur sowie mit sinkendem Z_{eff} ist erkennbar.

5.2 Temperatur- und Dichteprofile

Die aus der Thomson-Streuung gewonnenen Temperatur- und Dichteprofile zeigen eine erhebliche Abhängigkeit vom externen Stellaratorfeld (Abb. 5). Mit steigendem Stellaratorfeld tritt im Zentrum der Plasmasäule immer mehr eine Abflachung der Profile ein, während an den Flanken der Temperaturgradient gegenüber dem äquivalenten Tokamakfall – d. h. mit gleichem Heizstrom – größer wird. Der aus dem $T_e(r)$ -Profil ($Z_{\text{eff}} = \text{const}$) berechnete Radius der $q = 1$ -Fläche ist um 1–2 cm größer als der aus der Röntgenmessungen berechnete. Der $q = 1$ -Radius wächst mit zunehmendem Stellaratorfeld und liegt am Rande des abgeflachten Bereichs. Die Abflachung der Profile deutet auf einen verstärkten Transport im Zentrum hin, während an den Flanken das zusätzliche Stellaratorfeld den Einschluß zu verbessern scheint.

Bei hohen Strömen ($\iota(a) > 0.5$) wird auch eine Asymmetrie besonders der Dichteprofile beobachtet, eine Erklärung für diesen Effekt steht noch aus.

TABELLE 1

	ohne Gaspulsen		mit Gaspulsen	
	$\iota_0 = 0.23$	$\iota_0 = 0.055$	$\iota_0 = 0.23$	$\iota_0 = 0.055$
ι_p/ι_0	1.61	6.6	1.1	4.9
ι	0.6	0.42	0.53	0.32
J_p [kA]	22.0	23.0	18.2	17.5
U [V]	5.7	3.8	4.6	3.8
t [ms]	120	160	70	110
n_{e0} [10^{19} m^{-3}]	1.1	0.7	5.9	2.92
\bar{n}_e [10^{19} m^{-3}]	0.68	0.33	3.4	1.6
kT_{e0} [eV]	760	674	251	526
$\bar{k}T_e$ [eV]	432	390	178	269
kT_{i0} [eV]	220	95	185	180
W [J]	390	142	566	358
β_0	0.78	0.28	1.8	1.3
Z_{eff}	8.7	3.7	1.2	2.3
$j(0)$ [A/m^2]	199×10^4	212×10^4	106×10^4	234×10^4
τ_E [ms]	2.7	1.6	6.8	5.5
τ'_E [ms]	2.0	1.4	4.4	4

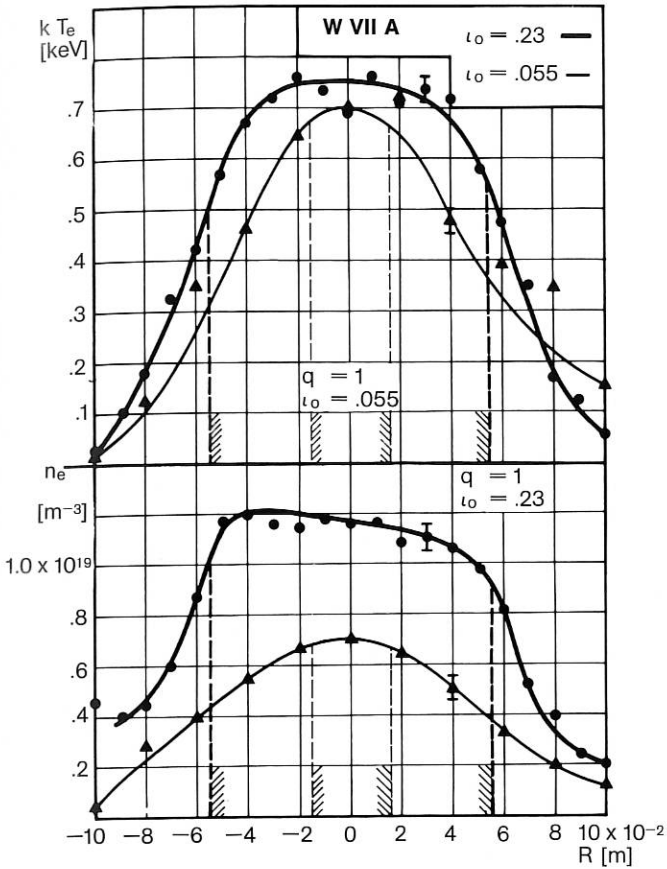


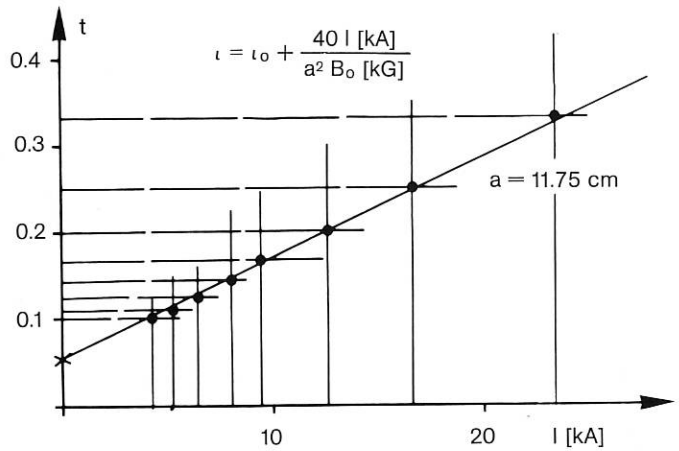
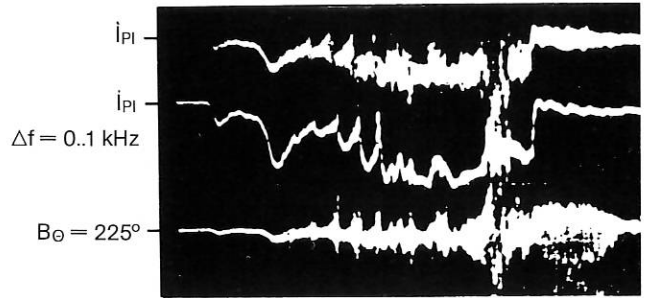
Abb. 5: Vergleich von Temperatur- und Dichteprofilen bei $l_0 = 0.23$ und $l_0 = 0.055$.

5.3 MHD-Stabilität

MHD-Oszillationen im Bereich von 25–30 kHz wurden mit verschiedenen Diagnostik-Einrichtungen wie der Rogowskispule, den B_θ -Spulen, den Lageerfassungsspulen, der Langmuirsonde am Plasmarand und den Potentialmessungen am Limiter beobachtet. Besonders in der Anstiegsphase des OH-Stroms setzen an bestimmten charakteristischen Werten des Stroms diese Oszillationen ein; die Dauer der oszillierenden Phase wächst mit steigendem Strom und beträgt typischerweise 1–3 ms. (Abb. 6). Das Auftreten dieser Schwingungen läßt sich mit dem Durchgang einer „rationalen“ magnetischen Fläche (d. h. $l = \text{rat. Zahl}$, $l = m/n$) durch die Plasmarandschicht korrelieren, wo-

bei l durch die Formel $l = l_0 + \frac{40 I}{a^2 B_0}$, $l_0 = \text{Rotations-}$

transformation des helikalen Feldes) beschrieben wird. Der effektive Plasmaradius a kann aus diesen diskreten Stromwerten ermittelt werden und liegt je nach Stärke des äußeren Stellaratorfeldes zwischen 9.5 cm und 11.7 cm (Abb. 6). Numerische Rechnungen bestätigen, daß auf den äußeren magnetischen Flächen die Addition der Rotationstransformationen nach obiger Formel als gute Näherung anzusehen ist.



Shot 2950, 17.9.1976 $B_0 = 2.5 \text{ T}$, $l_0 = 0.055$

Abb. 6: Einsatz von MHD-Oszillationen bei $l(a) = 1/m$ ($m = 3,4 \dots 10$) auf dem Plasmarand.

Die Auswirkungen auf die Plasmaparameter steigen mit wachsender Rotationstransformation. Plasmaström und Plasmadichte zeigen ein Plateau und sogar Einbrüche an den Durchgangsstellen. Besonders im Bereich $l = 0.66$ bleiben diese Verhältnisse bestehen und führen zu einem starken Energieverlust. Die Messungen mit der diamagnetischen Spule zeigen eine Reduktion des Plasmaenergieinhalts bis zum Faktor 2.

Eine Koinzidenz zwischen der beobachteten MHD-Aktivität und einem Anwachsen der Verunreinigungskonzentration nach spektroskopischen Messungen ist erkennbar.

In den Entladungen ohne zusätzlichen Gaspuls ($\bar{n}_e \approx 10^{19} \text{ m}^{-3}$) treten gleichzeitig mit dem Einsatz von Oszillationen Ausbrüche harter Röntgenstrahlen vom Limiter auf, was den bevorzugten Verlust von runaway-Elektronen zeigt.

Die Instabilitätszonen ΔJ_k lassen sich im Rahmen einer Tearing-mode-Theorie*) berechnen; das einfache Modell einer konstanten Stromverteilung bis zum Rand liefert aber zu große Instabilitätszonen. Detaillierte Rechnungen für den Fall kontinuierlicher Stromverteilung sind in Vorbereitung.

*) Ein numerischer Code hierzu wurde von Dr. K. Lackner erstellt.

5.4 Abbruchinstabilität

Die Beobachtungen über die Abbruchinstabilität im W VII A beschränken sich auf etwa 20 Entladungen, da bisher eine systematische Untersuchung noch nicht unternommen wurde. Es läßt sich aber bereits erkennen, daß das äußere helikale Feld auf den Abbruch einen stabilisierenden Einfluß ausübt. Bei kleinem externen Stellaratorfeld ($\iota_0 = 0.055$) wurde Stromabbruch bei einem maximalen Plasmastrom von 35 kA ($\iota = 0.5$) beobachtet. In Entladungen mit Gaspuls trat der Stromabbruch bereits in der Nähe von $\iota = 1/3$ auf, ebenso konnte die Plasmadichte ohne Stromabbruch nicht über $\tilde{n}_e \approx 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ gesteigert werden. Dieser Wert stimmt recht gut mit den Voraussagen von Murakami et al. überein.

Auch bei höherem Stellaratorfeld ($\iota_0 = 0.08; 0.11$) wurden noch Entladungen mit Stromabbruch beobachtet. Die kritischen Werte von ι auf dem Plasmarand ($a = 10\text{--}11 \text{ cm}$) lagen zwischen $\iota = 0.5$ und $\iota = 0.6$. In den Entladungen mit maximalem Stellaratorfeld ($\iota_0 = 0.23$) wurde die Abbruchinstabilität bisher nicht beobachtet ($I_{\text{max}} = 37 \text{ kA}$). Bemerkenswert ist weiterhin, daß unter diesen Umständen ein Dichtelimit nicht beobachtet wurde; die maximale Dichte wurde lediglich durch die Gaszufuhr und die verfügbare Heizleistung limitiert.

Eine Erklärung für den Einfluß des Stellaratorfeldes auf die Abbruchinstabilität steht noch aus. Ein Schlüssel zu ihrem Verständnis ist sicherlich das unterschiedliche Temperatur- und Stromprofil zwischen Stellarator- und Tokamakbetrieb. Vermutlich wirkt sich aber das Stellaratorfeld auch auf die Anwachsrate und das nichtlineare Verhalten der Abbruchinstabilität aus.

5.5 Hochfrequenzmessungen

Mit radial verschiebbaren koaxialen Sonden in Verbindung mit Kurzzeitmeßtechniken wurden verschiedenartige Messungen mit folgenden Ergebnissen durchgeführt:

- Durch die „Lower Hybrid“-Vorionisation (ca. 100 MHz, 3 kW) konnte das Gefäß nach Zündung durch die gun bereits bei etwa 2 kW mit der „Lower Hybrid“-Dichte (in H, $n \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$), wie erwartet, gefüllt werden. Plasmameterprofile wurden nicht gemessen, da die Sonden am Plasmarand selbst bei geringer HF-Leistung starke „runaway“-Bursts anzeigten, die auch durch Röntgendetektoren nachgewiesen wurden. HF-Messungen zeigten ein typisches Zerfallspektrum (Abb. 7) mit breiten Signalen um ω_{ci} , $2 \cdot \omega_{ci}$ (Ionengyrofrequenz $\omega_{ci} \approx 36 \text{ MHz}$) und Seitenbänder $\pm 10 \text{ MHz}$ um die Heizfrequenz.
- Im Frequenzbereich $\omega_{ci} < \omega < \omega_{pi}$ (ω_{ci} , ω_{pi} = Ionengyro-, Ionenplasmafrequenz) werden über weite Teile des OH-Pulses als auch in der Stromaufbau- und -abbauphase beim Durchgang durch rationale ι an der Plasmaoberfläche Signale um ω_{ci} , seiner Harmonischen und bei höheren Frequenzen in einem mehr kontinuierlichen Spektrum empfangen. Die Intensitäten dieser HF-Signale wachsen in solchen Entladungen, bei denen bei hohem rationalem ι zugleich erhöhte Plasmaverluste auftreten.

Bei Entladungen mit niedriger Plasmadichte zeigt das Spektrum eine obere Frequenzgrenze bei ω_{pi} . Abb. 8 zeigt ein Beispiel des zeitlichen Verhaltens dieser HF-Emission, gemessen bei festen Frequenzen zwischen 200 und 550 MHz. Die Umhüllende der beobachteten Signale höchster Frequenzen stimmt qualitativ mit dem Dichteverlauf überein. Bemerkenswert sind auch die in Abb. 8 ersichtlichen Entladungsphasen mit geringer oder keiner HF-Aktivität.

Unter Bedingungen hoher Plasmadichte ($n: 3\text{--}5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) werden Spektren mit diskreten Linien festen Abstandes $\Delta \omega \approx \omega_{ci}$ und mit einer oberen Frequenzgrenze deutlich unter ω_{pi} beobachtet.

In Entladungsphasen mit „internen Disruptions“ findet diese HF-Ausstrahlung in kurzen intensiven Bursts zu Zeiten jeder Relaxation statt, wobei die HF-Intensität zwischen 2 aufeinanderfolgenden Bursts stark reduziert ist. (Siehe Abb. 13 im Kapitel „weiche Röntgenstrahlung“.)

Die bisherigen HF-Messungen scheinen im Niederdichtefall (mit $T_e \gg T_i$) auf die Existenz einer durch suprathermische Elektronen angeregten Plasmainstabilität und im Hochdichtefall (mit $T_e > T_i$) auf eine stromgetriebene elektrostatische Ionenzyklotron-Driftinstabilität hinzudeuten, die nahe oder innerhalb der $q = 1$ -Fläche auftritt.

5.6 Weiche Röntgenstrahlung

In einer Beobachtungsebene wurden zwei Apparaturen zur Messung des Energiespektrums und des Flusses eingesetzt. Abb. 9 zeigt ein mit einem Si (Li)-Detektor aufgenommenes Röntgenspektrum von 70 aufeinanderfolgenden Plasmaentladungen. Über die Form des Spektrums kann die Maxwell'sche Energieverteilung der Elektronen kontrolliert werden. Nur bei dieser Verteilung sind Aussagen über den Verunreinigungsgrad sowie über die Elektronen-Temperatur (Filtermethode) aus den Flußmessungen gültig.

Abb. 10 zeigt die Anordnung zur Flußmessung, bestehend aus einem schwenkbaren Block mit 10 Silizium-Oberflächensperrschicht-Dioden und 4 ein-schiebbaren Filtern.

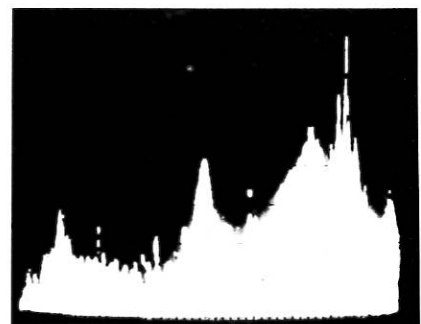
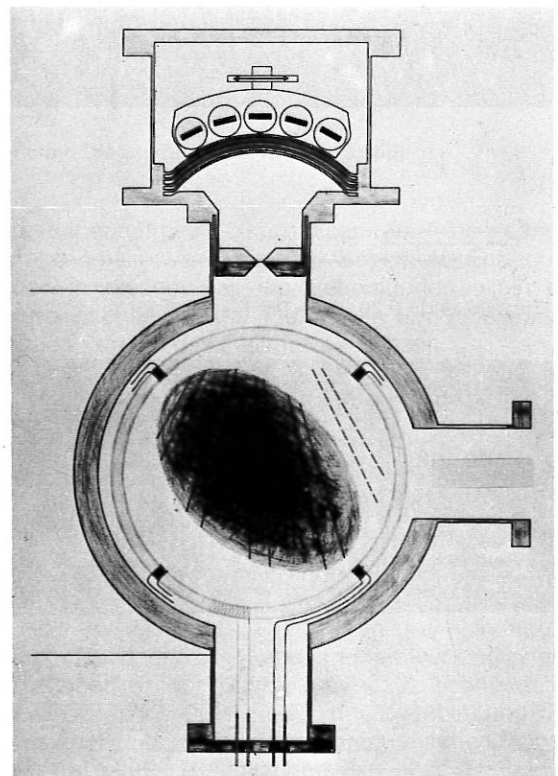
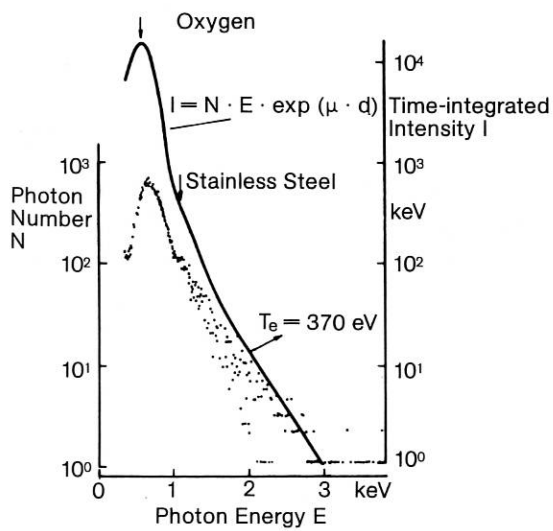
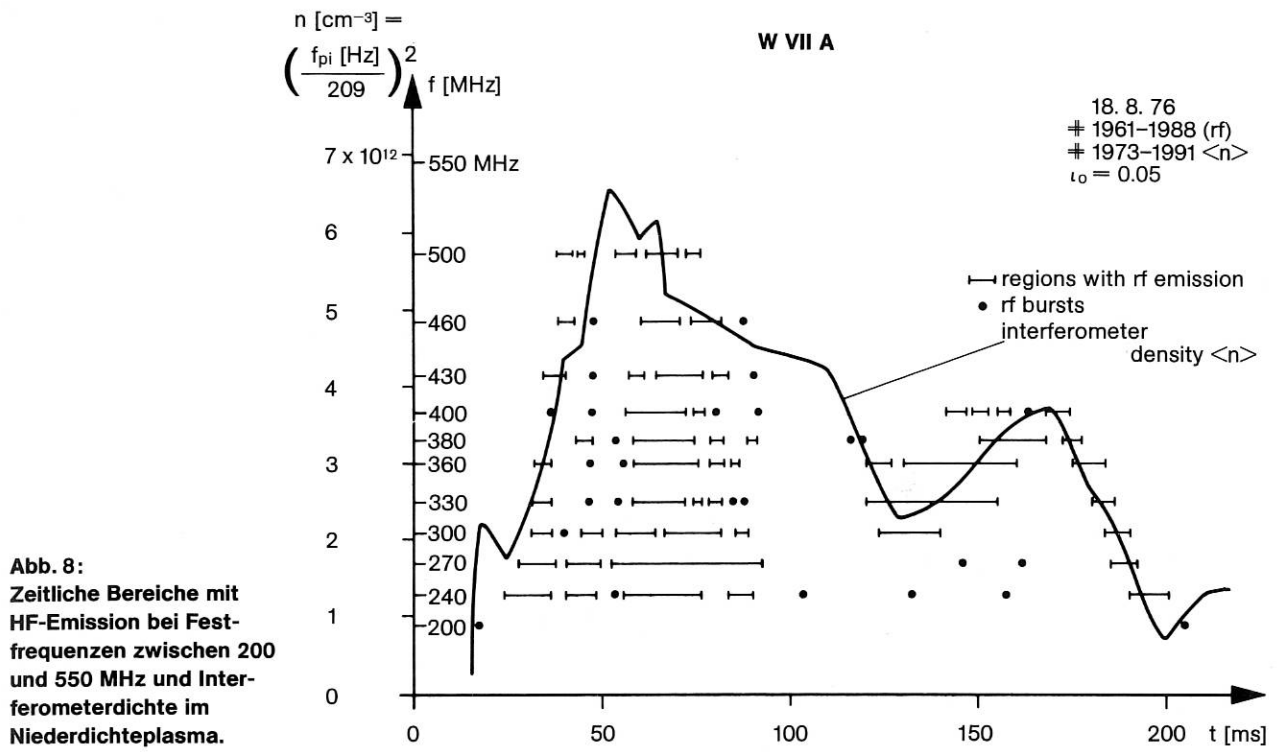
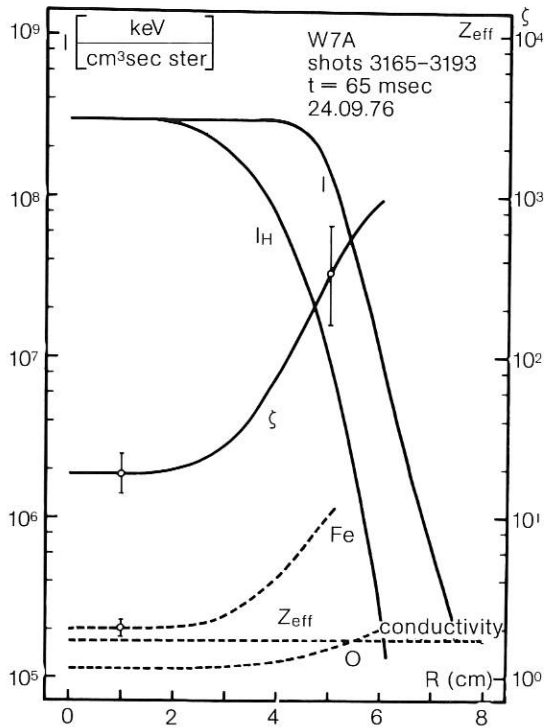


Abb. 7: Spektrum der Fluktuationen am Plasmarand 20 bis 120 MHz während der Lower-Hybrid-Vorionisation bei 106 MHz

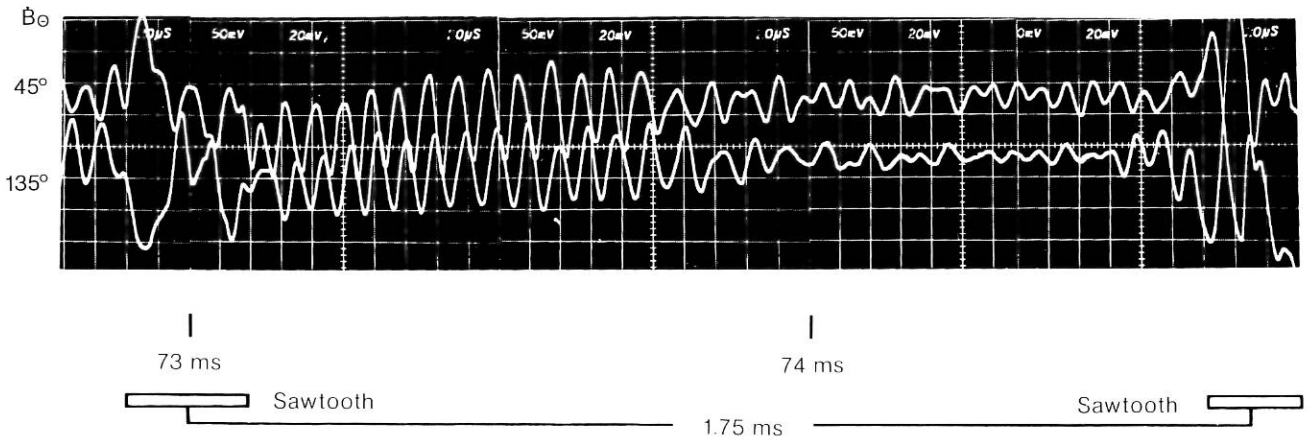




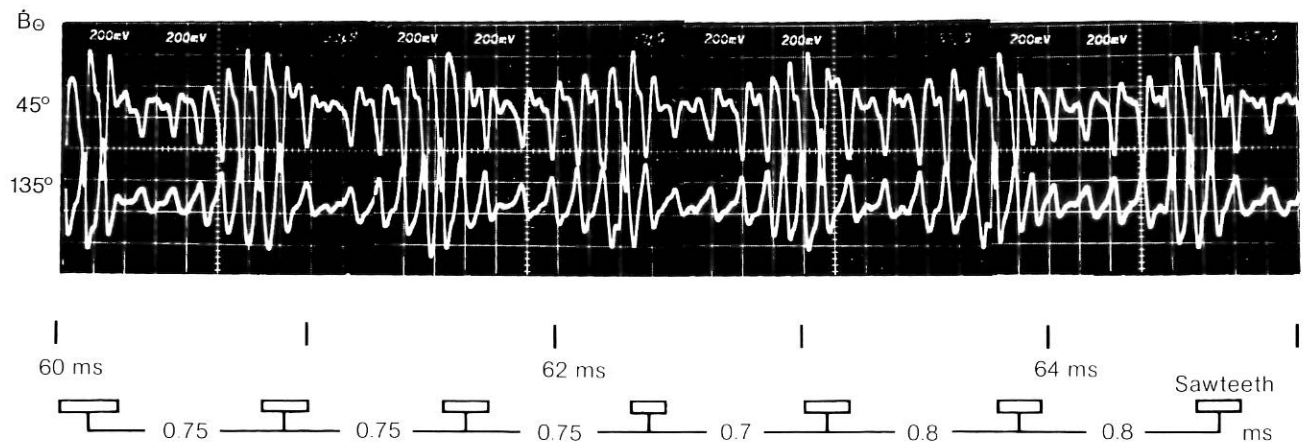
Die Empfindlichkeit der Detektoren liegt im Energiebereich von 1.3–8 keV. In Abb. 11 ist ein entabeltes Flußprofil oder Intensitätsprofil zusammen mit der für reinen Wasserstoff berechneten Intensität dargestellt. Die letztere wurde aus den gemessenen Radialprofilen der Elektronen-Temperatur und -Dichte (Thomson-Streuung) bestimmt. Daraus ergibt sich die radiale Abhängigkeit des Überhöhungsfaktors ζ der gemessenen Strahlung gegenüber der Strahlung von reinem Wasserstoff. Unter gewissen Annahmen über die Art der Verunreinigung (0,5% Fe oder 0,3% O im Corona-Gleichgewicht) kann hieraus $Z_{\text{eff}}(r)$ ermittelt werden (gestrichelte Kurven in Abb. 11). Der Fehlerbalken im Zentrum des Plasmas ist hauptsächlich gegeben durch die nicht bekannte chemische Zusammensetzung der Plasmaverunreinigungen, am Rande des Plasmas durch die Ungenauigkeit der Profilmessungen und durch die Annahme eines Corona-Gleichgewichts so-

Links:

Abb. 11: Radiale Intensitätsverteilung I der weichen Röntgenstrahlung. $\zeta(r)$ = Überhöhungsfaktor der Bremsstrahlung. Die gestrichelte Kurve gibt $Z_{\text{eff}}(r)$ wieder. I_H : berechnete Intensität für Wasserstoff.



a) Shot 2879, 15.9.76: $B_0 = 2.5$ T, $t_0 = 0.23$, $I_{PL} \approx 22$ kA, $t \approx 0.58$



b) Shot 2978, 17.9.76: $B_0 = 2.5$ T, $t_0 = 0.05$, $I_{PL} \approx 28$ kA, $t \approx 0.4$

Abb. 12: Sägezahnoszillationen und MHD-Moden auf den B_0 -Spulen.

Sawtooth and MHD Modes

$B_0 = 2.5 \text{ T}$ $\iota_0 = .055$

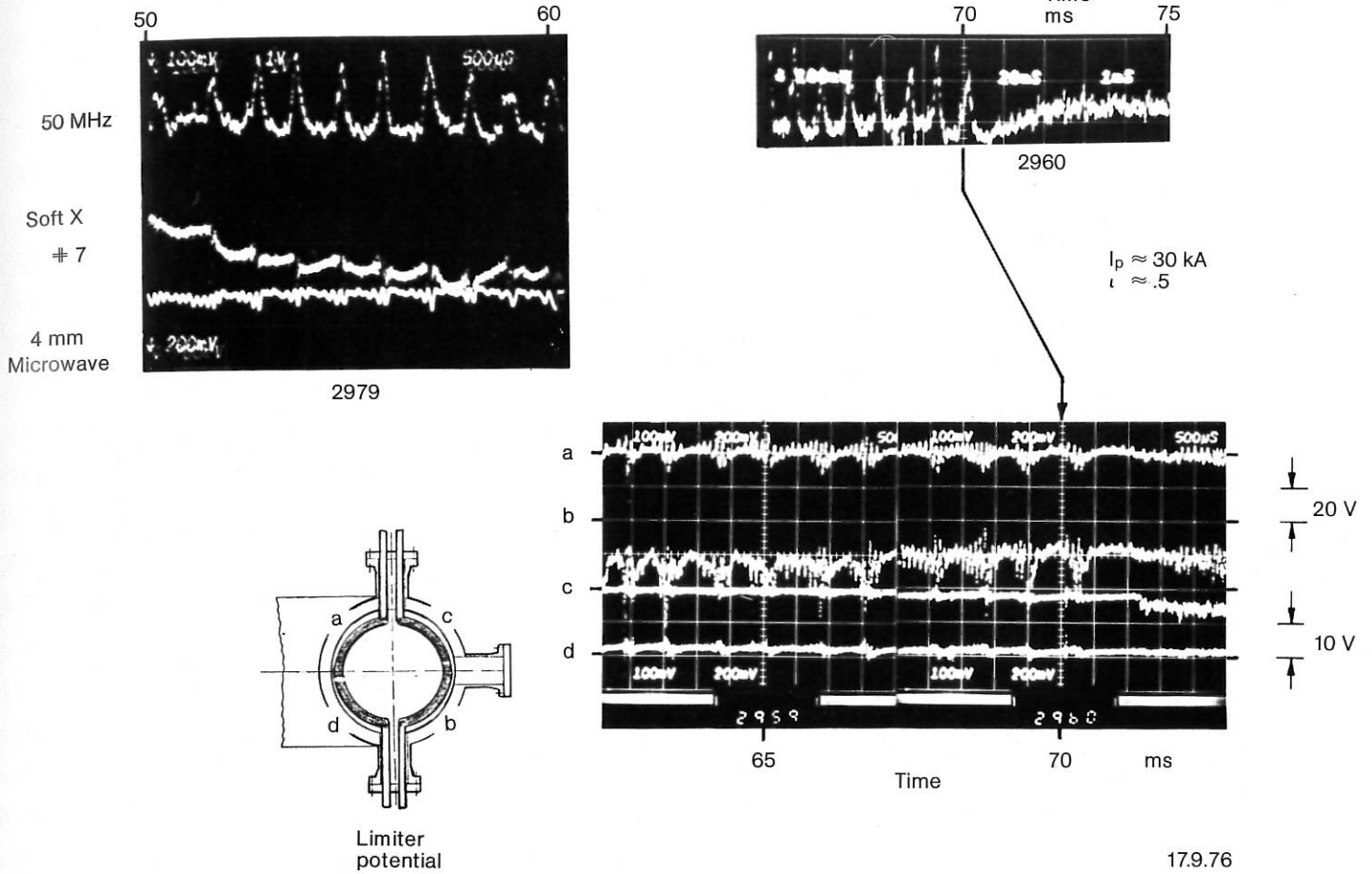


Abb. 13: Korrelation von Sägezahnoszillationen zwischen verschiedenen Diagnostiksignalen ($\iota_0 = 0.055$)

wie einer nicht bekannten Elektronen-Geschwindigkeitsverteilung. Zum Vergleich ist die aus Messungen der Leitfähigkeit gewonnene Kurve für Z_{eff} im unteren Teil von Abb. 11 eingezeichnet.

Nach dem Stromaufbau werden bei verschiedenen Diagnostik-Einrichtungen Sägezahn-Relaxationen und MHD-Moden beobachtet. Bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen können dabei $m=2, n=1$ und $m=3, n=2$ Moden mit Hilfe der B_0 -Spulen identifiziert werden. (Abb. 12).

In Abb. 13 sind die Fluktuationen in der Emission weicher Röntgenstrahlung für den Fall $\iota_0 = 0.055$ links oben zu erkennen. Eine dazu korrelierte Struktur findet man auch in den Signalen des 4-mm-Mikrowelleninterferometers sowie einer an der Außenseite des Plasmas angebrachten Sonde, die zur Messung der Emission im HF-Bereich dient. Auf der rechten Seite der Abbildung erkennt man die Korrelation der HF-bursts mit den Schwankungen der Limiterpotentiale.

Abb. 14 gibt links oben den Plasmastrom sowie die Fluktuationen der weichen Röntgenstrahlung für den Fall $\iota_0 = 0.23$ und einer hohen Elektronenlindichte von etwa $7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ wieder. Die Röntgenstrahlung

wurde dabei mit einer $50 \mu\text{m}$ dicken Be-Folie gefiltert. Gemessen bei etwa 80 ms nach Beginn der Entladung würden in diesem Fall die Relaxationen allein die Energieeinschlußzeit der Elektronen auf 7–13 ms im zentralen Bereich des Plasmas begrenzen.

Da für die Elektronen der Wert für $\tau_{E'}$ bei etwa 6 ms liegt, kann daraus auf einen erheblichen Beitrag der internen Relaxationen zu den Elektronenenergieverlusten geschlossen werden. In dem betrachteten Zeitbereich trat keine harte Röntgenstrahlung auf.

Bei hohen Elektronen-Dichten konnten die Relaxationen im Stellarator W VII A auch außerhalb des Plasmas festgestellt werden, was aus dem rechten Teil von Abb. 14 hervorgeht. Die oberen drei Kurven, die von dem Rechner PDP-11 ausgegeben wurden, zeigen Relaxationen in der Ringspannung V_L sowie damit korreliert ein Ansteigen von i , der Zeitableitung des Stroms, und einen Abfall des diamagnetischen Signals nKT um etwa 3%. Zur gleichen Zeit sind die Signale vom Limiterpotential b sowie von zwei B_0 -Spulen und zwei Detektoren für weiche Röntgenstrahlung abgebildet. Abb. 15 zeigt links unten schematisch die vier Limiterbögen und die Orientierung der magnetischen

Sawtooth and MHD Modes

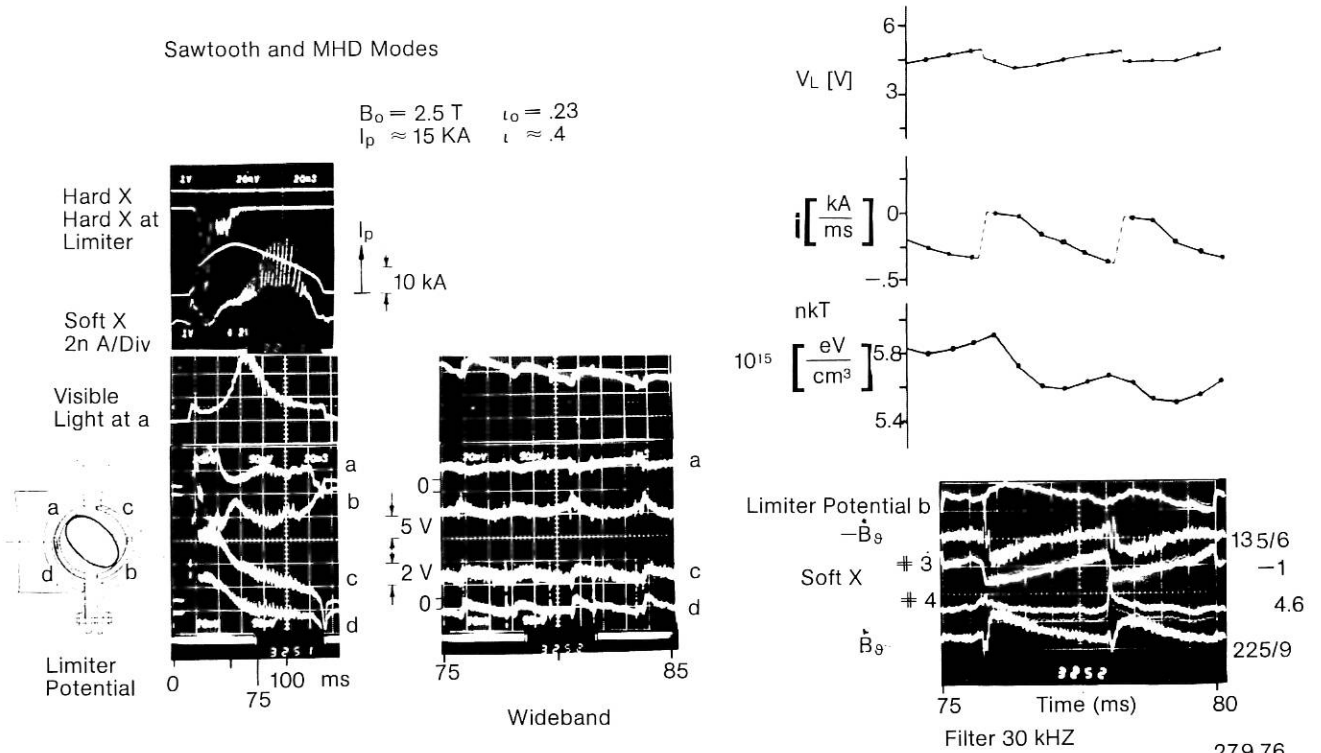


Abb. 14: Sägezahnswingungen während einer Entladung mit $t_0 = 0.23$.

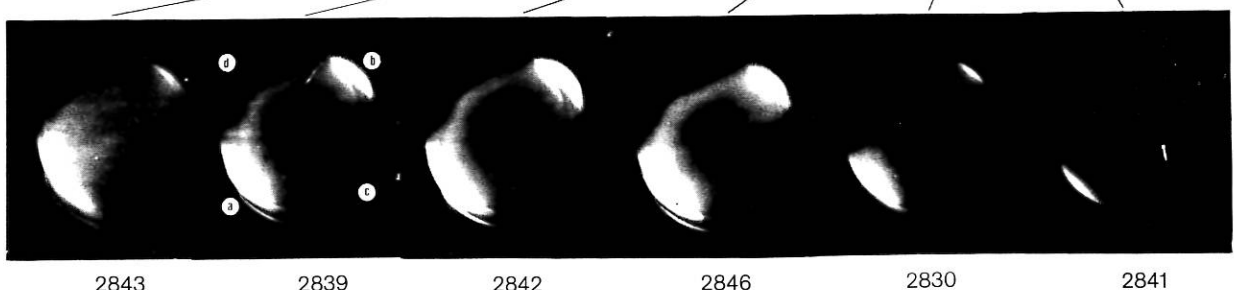
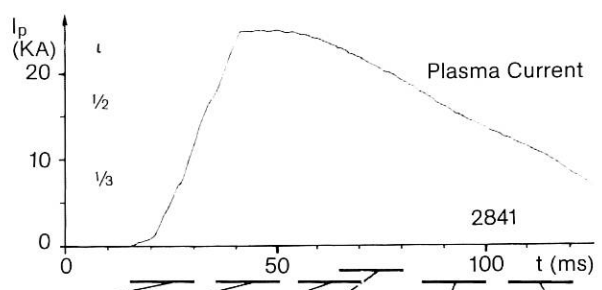
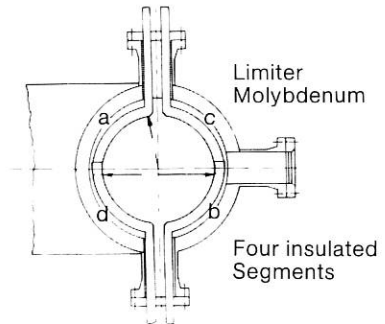
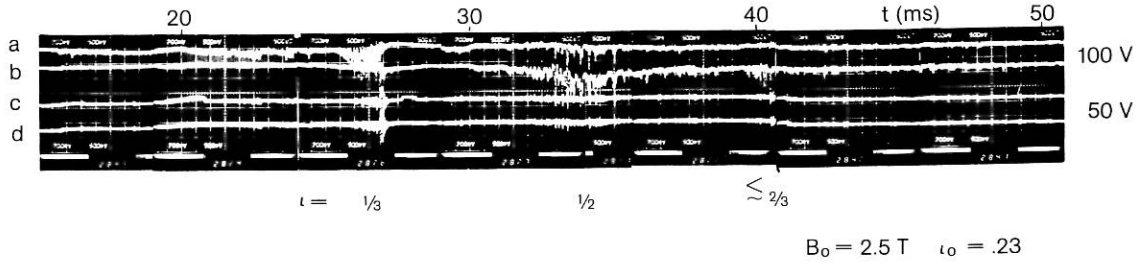


Abb. 15: Limitersignale bei t (a) = $1/3, 1/2$. Side-on Photography
 Plasmaquerschnitt in der Limiterebene. 13. 9. 76

Fläche. Die zugehörigen Spannungssignale (Größenordnung Volt) sind im mittleren Teil der Abbildung mit größerer Zeitauflösung dargestellt. Die Lichtemission im Sichtbaren von einem Limitersegment zeigt während dieses kurzen Zeitintervalls eine ähnliche Struktur (Frequenz und Phase) wie das Limiterpotential.

Für diese Entladungen ist ein nicht entabeltes Radialprofil der weichen Röntgenstrahlung zusammen mit der relativen Sägezahn-Amplitude $\Delta A/A$ in Abb. 16 dargestellt. Hieraus kann der Radius, bei dem $q=1$ angenommen wird, zu mehr als 3 cm bestimmt werden. Dies ist mehr als 30% des effektiven Plasmaradius. Unter der Annahme eines vom Radius unabhängigen Z_{eff} folgt aus Laser-Temperaturprofilen ein Wert von etwa 5 cm für den $q=1$ Radius.

5.7 Magnetische Flächen im W VII A

Die experimentelle Untersuchung magnetischer Flächen im W VII A wurde Anfang März 1976 abgeschlossen. Für Werte der Rotationstransformation $0.15 < \iota_0 < 0.72$ besteht gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten magnetischen Flächen, die Verscherung ist gering. Bei Variation der Ströme I_{HX} in der Helix und I_{HS} im Toroidalfeld wird $\iota_0 = 0.22 (I_{\text{HX}}/I_{\text{HS}})^2 + 0.01 (I_{\text{HX}}/I_{\text{HS}})^4$ gefunden. Radiale und vertikale Störfelder in der Apparatur wurden zu etwa 4% des Toroidalfeldes abgeschätzt. Die aufgrund von früheren Rechnungen erwarteten Inseln im Stellaratorfeld konnten bei $\iota_0 = 1/4$ experimentell nicht identifiziert werden. Für irrationales $\iota_0 \approx 0.23$ zeigte ein überlagertes lokales Störfeld $B_L \leq 2\%$ des Toroidalfeldes keine erhebliche Störung der beobachteten Flächen.

2. WEGA

C. Mahn, W. Ohlendorf, P. Javel, G. W. Pacher, H. D. Pacher, J.-G. Wegrowe (IPP Garching)

J. Blanc, P. Blanc, W. Hess, G. Ichtchenko, P. Lallia, T. K. Nguyen, M. Petitjean, G. Schenk, G. Tonon, N. Uhre (CEA Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble)

M. Durvaux (ERM Bruxelles)

M. Lipa (Eur.)

S. Takamura, Gast aus Nagoya Univ.

Im Berichtsjahr wurden die Experimente in der Apparatur WEGA – in Grenoble erstellt und betrieben als gemeinsames Projekt des IPP und der CEA unter Mitwirkung der ERM Bruxelles – fortgesetzt. Die Apparatur wird derzeit noch als Tokamak betrieben, da die von der Industrie zu vertretende Verzögerung der Lieferung des Stellaratorgefäßes noch andauert. Ziel der Untersuchungen ist es, dem ohmsch geheizten Ausgangs-plasma HF-Leistung bei der unteren Hybridfrequenz zuzuführen und deren Einfluß auf die Plasmaparameter sowie die Mechanismen der Heizung zu untersuchen.

Die Parameter des ohmsch geheizten Ausgangs-plasmas sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die in WEGA erzielten Parameter sind durchaus typisch für eine Apparatur dieser Größenordnung. Eine Besonderheit der Apparatur ist es, daß sie zwar einen Transformator mit Eisenkern, aber keine Kupferschale besitzt. Zur Erzeugung des radialen Gleichgewichts und dessen Stabilisierung wurde ein Rückkopplungssystem zur Steuerung des Vertikalfeldes erstellt / 44 /. Mit Hilfe

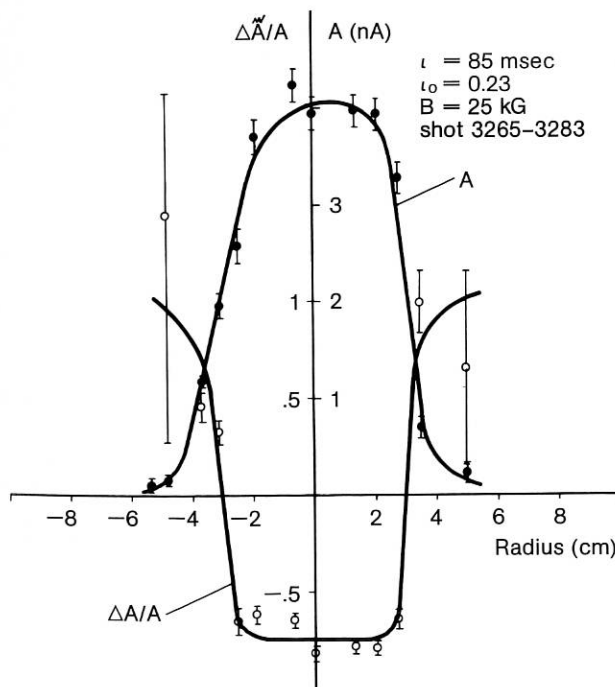


Abb. 16: Radiale Intensität der weichen Röntgenstrahlung und relative Amplitude der Sägezahn-schwingungen.

TABELLE 2: WEGA-Entladungsparameter

Charakteristika der Maschine:

Großer Plasmaradius	$R_0 = 72$ cm
Kleiner Plasmaradius	$a_p = 13-16$ cm
Wandradius	$a_w = 22$ cm
Toroidalfeld	$B_0 = 1.45$ T

Charakteristika des Plasmas ohne HF

D plasma	
Plasmastrom	$I_p = 45-60$ kA
Ohmsche Heizleistung	$P_r = 100-120$ kW
Elektronendichte (Spitze)	$n_e(o) = 1-6 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$
Elektronentemperatur (Spitze)	$T_e(o) = 600-900$ eV
Ionentemperatur (Spitze)	$T_i(o) = 150-250$ eV
Effektive Ladung	$Z_{\text{eff}} = 3-6$
Energieeinschlußzeit	$\tau_E = 3-5$ ms

Charakteristika des HF-Systems

Frequenz	$f = 500$ MHz
Spitzenleistung	$P_{\text{HF}} = 100$ kW
Maximale Pulsdauer	$\Delta t_{\text{HF}} = 5-15$ ms
Brechungsindex (n/B_0)	$N_H = k_H / k_0 = 2$

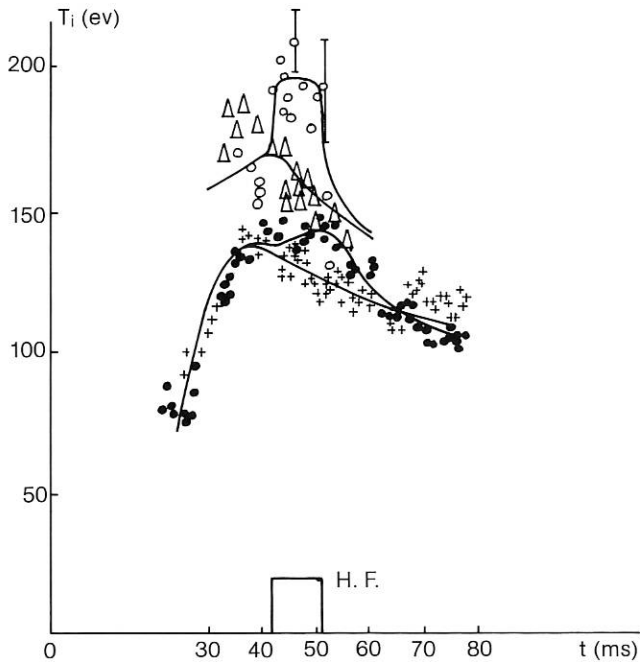


Abb. 17: Heizung der Ionen während der HF-Impulse (80 kW, 10 ms).

Die in dieser Serie gemessene mäßige Temperaturerhöhung (siehe Text) wurde mittels Analyse umgeladener Teilchen einerseits (Δ ohne HF, \circ mit HF) und andererseits durch Verbreiterung einer OV II Linie ($+$ ohne HF, \bullet mit HF) beobachtet.

dieses Systems gelang es, die Plasmalage während der ganzen Entladungsdauer auf besser als 1 cm konstant zu halten, vor allem aber auch die Plasmaverschiebungen während des HF-Pulses auf einige Millimeter zu beschränken. Ohne Rückkopplung waren diese so groß, daß sie zum Abbruch der Entladung führen konnten.

Im Berichtsjahr wurden dem Plasma bis zu 90 kW HF-Leistung bei Pulslängen bis zu 10 ms zugeführt. Einkopplung (mittels zweier Schleifen in Gegenphase) und Anpassung an das Plasma erwiesen sich als technisch problemlos. Die erste Experimentierphase zeigte schon ermutigende Resultate / 44 / 29 / 40 /. (Abb. 17)

Die zwei eingesetzten Messungen der Ionentemperatur, nämlich Energieanalyse der umgeladenen Teilchen senkrecht zum Magnetfeld und Dopplerverbreiterung einer OVII Verunreinigungslinie, zeigten übereinstimmend eine Erhöhung der Ionentemperatur bei verschiedenen Plasmaradien um 20–30% während der HF. Die Übereinstimmung der beiden Methoden sowie die lange Abfallzeit (einige ms) nach Abschalten der HF ließen annehmen, daß die Messung eine Temperaturerhöhung der gesamten Ionenbevölkerung im

Inneren des Plasmas widerspiegelte. Dieser Temperaturerhöhung entsprach jedoch nur ein kleiner Teil der eingekoppelten HF-Leistung.

In der Folge wurde die Geometrie der HF-Einkopplung geändert, um mehr Leistung bei niedriger Wellenzahl parallel zum Magnetfeld, jedoch oberhalb der „accessibility“-Grenze, einzukoppeln, was theoretisch zu effizienterer Heizung der Ionen im Inneren des Plasmas führen sollte. Die Resultate dieser Messungen wurden bei den Konferenzen in San Francisco und Paris vorgetragen / 32 / 31 / 33 /. Abb. 18 zeigt typische Entladungen mit und ohne HF. Aus vier komplementären Meßmethoden, (Thomsonstreuung, weiche Röntgenstrahlung, harte Röntgenstrahlung, Synchrotronstrahlung), die zusammen die gesamte Elektronenenergieverteilung abdecken, ergab sich, daß diese durch die HF im wesentlichen unverändert blieb und daß der Energieinhalt der Elektronen in etwa konstant blieb (Abb. 19). Was die Ionen betrifft, so stand nur die Messung der senkrechten Ionenenergie mittels Umladung zur Verfügung. Diese ergab, daß die Ionentemperatur um 90 eV auf 240 eV, also um 60% angehoben wurde, bei langer Abfallzeit (2 ms) nach Abschalten der HF. Obwohl eine genaue Energiebilanz noch nicht

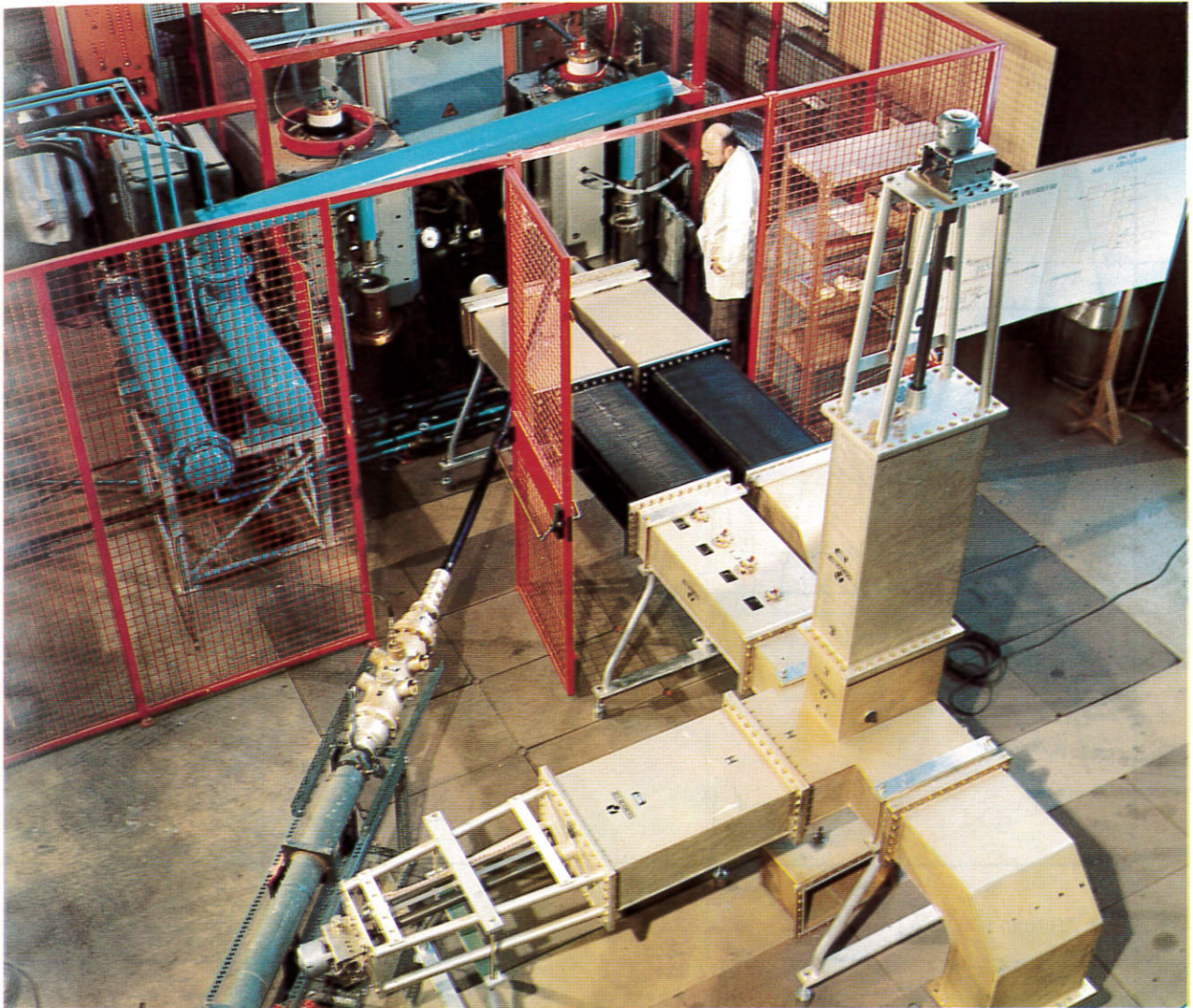


Abb. 20: Inbetriebnahme der 200 kW/500 MHz Oszillatoren zur Plasmaheizung bei der unteren Hybridfrequenz in WEGA. (Aufnahme: „Techniques des Fluides“ Service Photo-Cinéma, Grenoble)

zur Verfügung steht, sollte diese Temperaturerhöhung nunmehr einem beträchtlichen Teil der eingekoppelten HF-Leistung entsprechen.

In der Folge gilt es, dieses ermutigende Resultat – die Temperaturerhöhung von 1 eV/kW ist immerhin von gleicher Größenordnung wie die bei Neutralteilcheneinschuß erzielte – zu erhärten. Hierzu werden vergleichende Messungen zwischen Umladung und Doppellerverbreiterung von Verunreinigungslinien, sowohl senkrecht als auch parallel zum Magnetfeld, vorbereitet. Diese Experimente werden bei HF-Leistungen

bis zu 200 kW (Abb. 20) durchgeführt werden. Ein genaueres Studium der Dichte- und Temperaturprofile sollte Informationen über die Energiebilanz erbringen, während von Hochfrequenzmessungen mittels Antennen sowie – in weiterer Zukunft – Streuexperimenten und interferometrischen Messungen Aufschlüsse über die Fortpflanzung der Wellen im Plasma und den Mechanismus der Heizung erwartet werden. Bei Anlieferung des Stellaratorgefäßes / 39 / werden dann die HF-Experimente im ohmsch geheizten Stellaratorplasma fortgesetzt.

Siehe die Abbildungen 18 und 19 auf den Seiten 30 und 31!

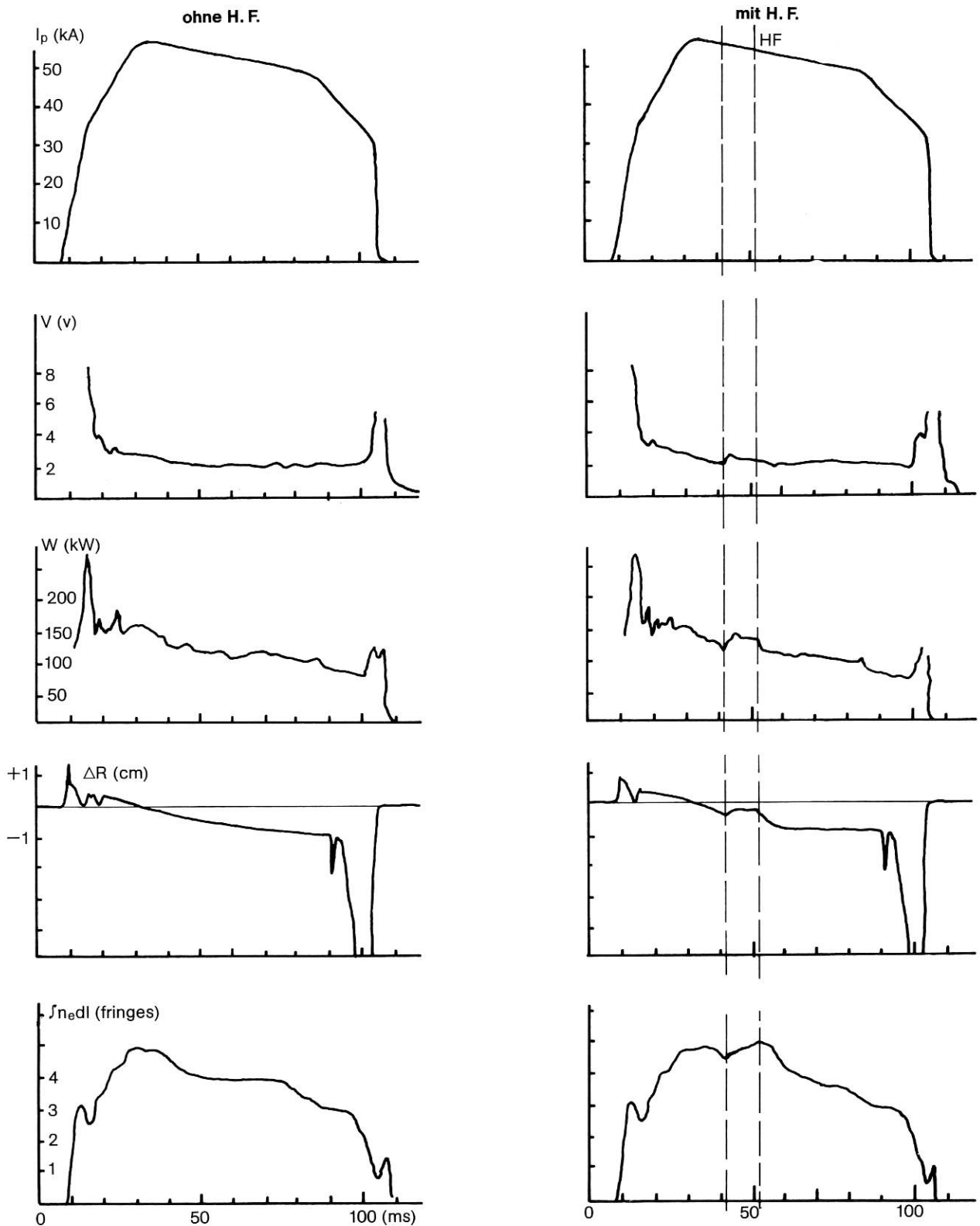


Abb. 18: Vergleich der Entladungsparameter ohne und mit HF (90 kW, 10 ms).
 Von oben nach unten: Entladungsstrom, resistive Ringspannung, ohmsche Leistung, radiale Plasma-
 lage, Elektronenliniendichte (1 Fringe $\approx 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ Spitzendichte).

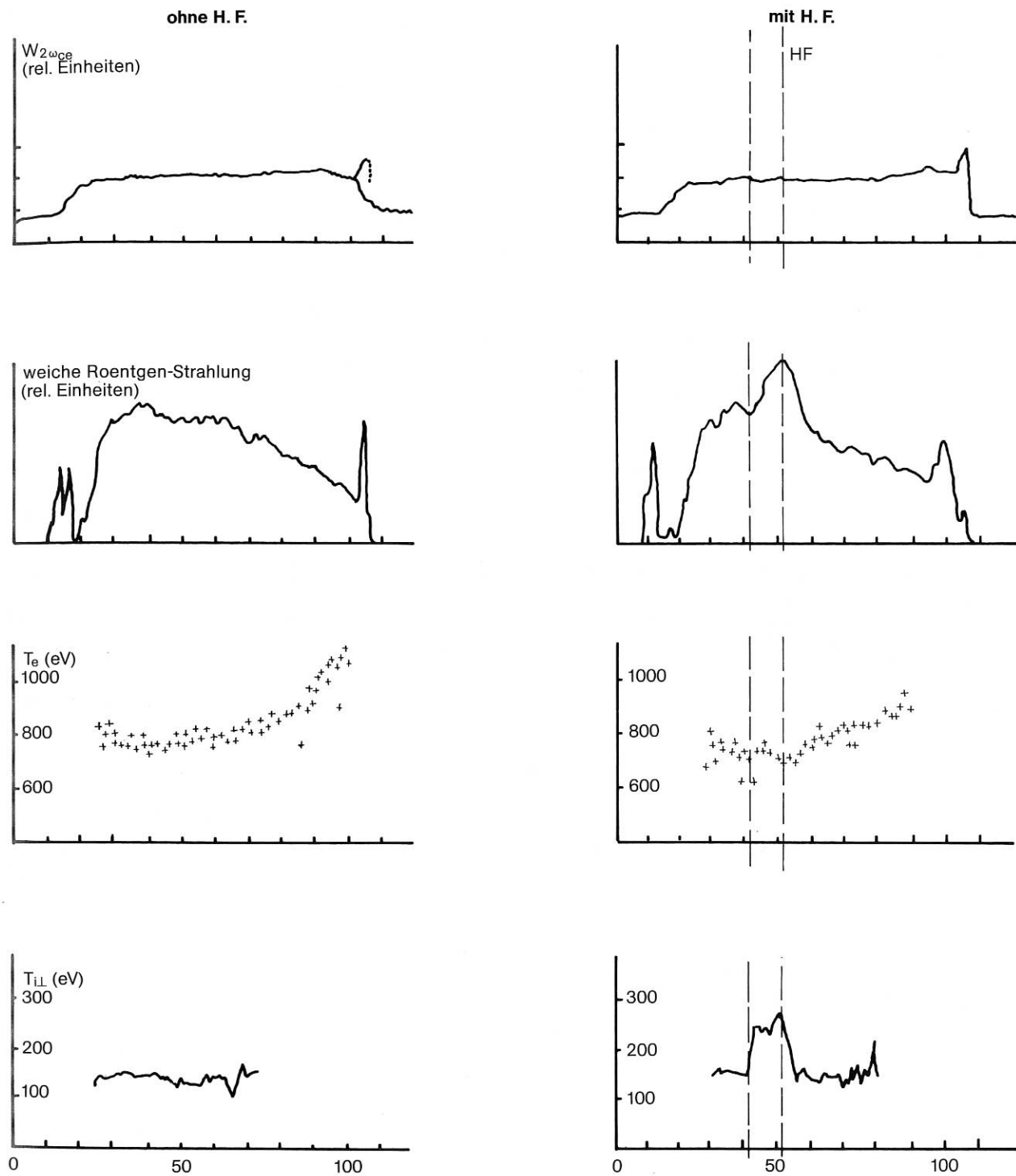


Abb. 19: Vergleich der Entladungparameter ohne und mit HF (90 kW, 10 ms). Von oben nach unten: Synchrotronstrahlung bei $2 \omega_{ce}$, weiche Röntgenstrahlung, Elektronentemperatur (von weichen Röntgenstrahlung-Absorbertechnik), Ionentemperatur (von senkrecht beobachteten umgeladenen Teilchen).

Bereich Tokamak

(Dr. Gerhart von Gierke)

Im Berichtsjahre wurden einerseits die Untersuchungen am PULSATOR fortgeführt, wobei zu einigen für die Tokamakphysik wichtigen Fragen wesentliche Beiträge geliefert werden konnten; andererseits konzentrierten sich die Anstrengungen auf den Aufbau von ASDEX und die Vorbereitung der für dieses Experiment notwendigen Diagnostik.

*Am **PULSATOR** stand das bereits 1975 erschlossene Hochdichteregime, das sich durch eine Reihe günstiger Plasmaeigenschaften auszeichnet, im Mittelpunkt der Untersuchungen. Durch Parameterstudien wurden die Grenzen abgesteckt, innerhalb deren der Aufbau der hohen Dichte möglich ist.*

Zentrales Interesse kam der Abbruchinstabilität zu, die die Dauer der Entladungen und damit den Dichteanstieg begrenzt. Die Vorgänge vor und während dieser Instabilität wurden detailliert untersucht, woraus sich wichtige Hinweise zum theoretischen Verständnis ergaben. Die bereits früher gefundene stabilisierende Wirkung helikaler Zusatzfelder wurde im Hochdichteregime ebenfalls beobachtet und einem Verständnis näher gebracht.

Da das Hochdichteregime nur mit verhältnismäßig reinen Ausgangsplasmen erzeugt werden kann, wurden die Verunreinigungsmessungen weiter verfeinert. Zweifelsfrei konnte gezeigt werden, daß die schweren Verunreinigungen nach Einströmen des Wasserstoffs absolut reduziert werden und die leichten Verunreinigungen relativ nicht ansteigen. Eine Anhäufung der Verunreinigungen auf der Achse war nicht zu beobachten; es gibt dagegen Hinweise auf eine Verarmung im Zentrum.

Die Diagnostik am PULSATOR wurde wesentlich weiterentwickelt. Es können nun Profile der Ladungsaustauschneutralen und in Kürze auch Stromdichteprofile (Lithium-Strahl-Methode) gemessen werden.

Die Vorbereitungsarbeiten zur Füllung mit gefrorenen Wasserstoffpellets wurden begonnen, Ergebnisse sind Anfang 1977 zu erwarten.

Der PML-Torus wurde größtenteils fertiggestellt. Falls über seinen Einbau positiv entschieden wird, kann mit seiner Hilfe ein ASDEX-ähnlicher magnetischer Limiter erzeugt und die Untersuchung des Einflusses helikaler Zusatzfelder auf die Abbruchinstabilität erheblich erweitert werden.

Die Wissenschaftliche Leitung des IPP hat im Oktober 1976 die ins Auge gefaßte Stilllegung von PULSATOR um ein weiteres Jahr verschoben, so daß auch 1977 PULSATOR als eines der wichtigsten laufenden Experimente des Instituts zur Verfügung stehen wird.

*Beim Großexperiment **ASDEX**, in dem die Wirkung eines Divertors auf die Plasmaverunreinigungen untersucht werden soll, wurde die Projektierung der noch ausstehenden Komponenten im Jahre 1976 soweit abgeschlossen, daß diese Kompo-*

nenten entweder bereits in Auftrag gegeben werden konnten (Vakuumsystem, Divertor-Kühlsystem, Multipolspulen, Datenerfassung) oder im ersten Halbjahr 1977 vergeben werden können (Steuerung, Divertorpumpsystem, OH-Schalter). Darüber hinaus konnte Mitte 1976 die Montage des mechanischen Gerüsts und der Hauptfeldspulen begonnen und bis zum Januar 1977 abgeschlossen werden. Parallel dazu lief die Fertigung der OH-Spulen und des Vakuumgefäßes, deren Montage 1977 erfolgen soll. Mit der Inbetriebnahme von ASDEX kann somit nach derzeitigem Planungsstand für den Spätsommer 1978 gerechnet werden.

Um die Divertorwirkung an einem in Temperatur und Dichte möglichst reaktorrelevanten Plasma untersuchen zu können, ist für ASDEX eine Zusatzheizung mittels Neutralinjektion mit einer im Plasma absorbierten Leistung von mindestens 2 MW vorgesehen (Ohm'sche Heizleistung 0.5 – 1 MW). Zur Festlegung der für die Injektoren anzustrebenden Parameter – insbesondere der Beschleunigungsspannung – wurden im Projekt Neutralinjektion ausführliche Rechnungen zur Abhängigkeit der Leistungs-, Teilchen- und Verunreinigungsbilanz von der Energie der eingeschlossenen Neutralteilchen durchgeführt.

Für die im Divertorbetrieb notwendige Teilchennachfüllung sind zunächst der Einschub von Neutralteilchen und Clustern sowie Kaltgaseinlaß vorgesehen. Hier wurden vergleichende Untersuchungen angestellt, wie sich diese verschiedenen Nachfüllmethoden auf die Divertoreffektivität auswirken. Die Arbeiten zur Clusterinjektion werden im Institut für Kernverfahrenstechnik, Karlsruhe, in Zusammenarbeit mit dem IPP durchgeführt. Für Ende 1976 wurde die Lieferung des für die Clusterinjektion vorgesehenen 1 MV Injektors erwartet. Diese Nachfüllmethode sollte an ASDEX etwa Mitte 1979 zur Verfügung stehen.

Im Berichtsjahre wurde mit der Planung und Vorbereitung der für ASDEX notwendigen Diagnostik begonnen. Die bereits an PULSATOR eingesetzte Diagnostik wird von Mitarbeitern dieses Projektes für ASDEX adaptiert und weiterentwickelt. Daneben sind spezielle Verfahren zur Untersuchung der Plasmarandschicht, der Divertorwirkung und der Plasma-Wand-Wechselwirkung (letzteres in Zusammenarbeit mit dem Projekt PWW) in Vorbereitung.

1. Projekt PULSATOR

(S. Sesnic, K. Büchl¹⁾, B. Cannici²⁾, W. Engelhardt, G. Fußmann³⁾, J. Gernhardt, E. Glock, N. Gottardi²⁾, D. Gröning, H. Hohenöcker, F. Karger, M. Kick⁴⁾, A. I. Kislyakov⁵⁾, O. Klüber³⁾, K. Lackner³⁾, R. Lang¹⁾, G. Lisitano⁶⁾, H. M. Mayer, K. McCormick, D. Meisel, P. Morand²⁾, F. Wagner³⁾, H. P. Zehrfeld)

Das 1975 im PULSATOR gefundene Hochdichteregime wurde 1976 eingehend untersucht. Zu seinem Verständnis lieferten die Neutralteilchendiagnostik und das Studium der Verunreinigungen wertvolle Beiträge. Da das Regime gegen höhere β -Werte durch die Abbruchinstabilität begrenzt ist, lag ein Schwerpunkt auf der Untersuchung dieser Instabilität. Besonders bei den Ereignissen, die dem Stromabbruch vorausgehen, konnten dabei neue Erkenntnisse gewonnen werden.

1.1 Resultate am PULSATOR

1.1.1 Abbruchinstabilität

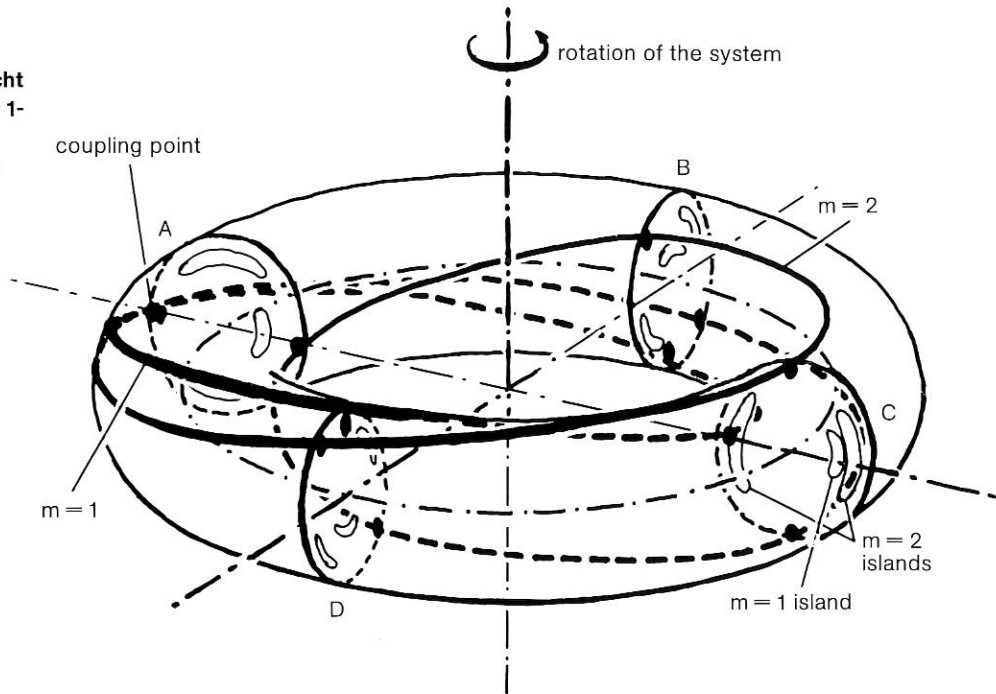
Ohne Kontrolle der Abbruchinstabilität ist ein Tokamak nicht als Fusionsreaktor vorstellbar. Diese entscheidende Rolle der Disruption sowie ihre – 1974 am PULSATOR gefundene – empfindliche Reaktion auf resonante helikale Felder gaben den Anlaß, die Vorgeschichte und damit womöglich die Ursachen der Abbruchinstabilität genauer zu studieren. Da der Zeitpunkt des Abbruchs von Schuß zu Schuß stärker schwankt als die interessierenden Zeiten des Abbruchs, wurden alle wichtigen Signale unmittelbar vor und während des negativen Spannungsspikes über einen 16-Kanal-Transientrecorder mit hoher Zeitauflösung registriert. Die Ergebnisse im einzelnen sind:

- a) Etwa 10 ms vor dem Stromabbruch wächst die Amplitude und Periodendauer der $m = 2$ -Mode und koppelt einige ms vor dem Abbruch mit der $m = 1$ -Mode; beide Moden rotieren (die Maxima an der Außenseite des Torus gekoppelt) in Richtung der toroidalen Elektronendrift mit wachsender Amplitude (Abb. 1).

¹⁾ Projekt LPQ, ²⁾ Gastforscher, ³⁾ Projekt ASDEX,

⁴⁾ Projekt W VII A, ⁵⁾ Ioffé Institut, Leningrad, ⁶⁾ EURATOM

Abb. 1:
Schematische Ansicht
der gekoppelten $m = 1$ -
und $m = 2$ -Moden
mit entsprechenden
Inseln.



b) Wenn das System der beiden Moden eine bestimmte Amplitude erreicht hat, werden ein oder mehrere Ausbrüche von sehr harten ($E > 10$ MeV) Röntgenstrahlen vom Limiter beobachtet (Abb. 2), die mit der Rotation der Moden synchronisiert sind. Die harten Röntgenstrahlen scheinen – kurz hintereinander – von den beiden Stellen des Limiters zu

kommen, an denen die $m = 2$ -Inseln berühren (Innen- und Außenbogen). Diese Stellen werden aktiviert durch (γ, n) an Mo.

c) Etwa $30 \mu\text{s}$ nach Beginn des stärksten Ausbruchs sinkt die Elektronentemperatur im Innern des Plasmas ab (Abb. 2), wodurch ein stark verbreitertes Temperaturprofil entsteht.

d) Ungefähr $20 \mu\text{s}$ nach dem Temperaturabfall liegt die steilste Flanke des negativen Spannungsspikes, der von einem positiven Spike im Plasmastrom und von einer Bewegung des Plasmas nach innen begleitet wird. Zur gleichen Zeit steigt das Signal der $H\alpha$ -Emission und der schnellen Neutrals stark an (Abb. 2).

Die Stärke des Temperatureinbruchs in der Mitte bestimmt die Intensität aller folgenden Signale und schließlich auch die Tiefe des Stromabbruchs. Der vollständige Rückgang des Stroms auf Null innerhalb weniger ms geschieht oft über eine Vielzahl von Einzelabbrüchen unterschiedlicher Intensität. So können z.B. die Amplituden der negativen Spannungsspikes über drei Größenordnungen variieren.

Die Ergebnisse weisen daraufhin, daß die Drift-Flächen der runaway-Elektronen ähnliche helikale Störungssysteme aufweisen wie die magnetischen Oberflächen und beim Anwachsen der Störung den Limiter berühren. Das Anwachsen der beiden Moden und damit deren Inseln hat schließlich lokal erhöhten Transport und dadurch einen Temperaturabfall im Zentrum zur Folge. Das verringerte β_p führt zu einer Verschiebung des Plasmas nach innen. Die Natur der gleichzeitig erfolgenden schnellen Expansion und vor allem deren Zeitskala ist noch nicht geklärt. Ohne „reconnection“ von Feldlinien läßt sie sich nicht vorstellen.

Aus den gewonnenen Resultaten geht hervor, daß man zur Stabilisierung der Disruption vor dem zentralen Temperatureinbruch in den Entladungsverlauf eingreifen müßte. Eine Möglichkeit dazu bietet die Methode der resonanten helikalen Felder.

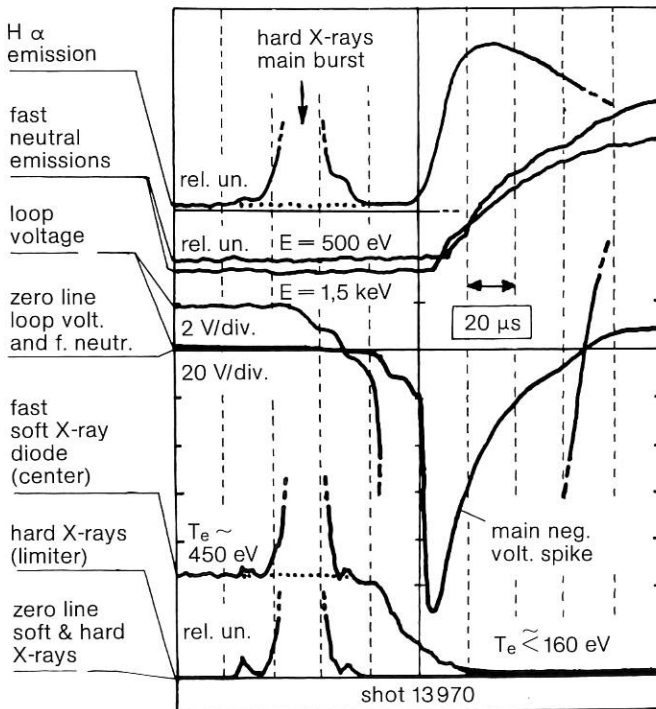


Abb. 2: $200 \mu\text{s}$ -Oszillogramm einiger Ereignisse, die den negativen Spannungsspike begleiten.

1.1.2 Resonante helikale Felder

Der Einfluß eines helikalen Feldes mit $m = 2$, $n = 1$ auf den Stromabbruch wird in Abb. 3 gezeigt.

- a) Der stabilisierende Einfluß des helikalen Feldes beruht auf der Unterdrückung der $m = 2$ Mode. Dadurch wird eine Kopplung mit der $m = 1$ und damit deren Anwachsen vermieden (SHF).
- b) Der Temperaturabfall im Zentrum kann ohne rotierende Moden auch mit Hilfe eines genügend starken äußeren helikalen Feldes erreicht werden. Die Disruption läuft in diesem Fall (DHF) beginnend mit dem Ausbruch von harten Röntgenstrahlen genauso wie im spontanen Fall (NHF).
- c) Die Kopplung von $m = 2$ - und $m = 1$ -Mode wird auch dadurch demonstriert, daß man mit Hilfe des äußeren $m = 2$ -Feldes beide Moden stoppen kann.

Wie theoretische Abschätzungen zeigen, kann die Unterdrückung der $m = 2$ -Mode mit Hilfe des kleinen resonanten helikalen Feldes und die sich daraus ergebende Verzögerung der Abbruchinstabilität dadurch erklärt werden, daß durch lokalisierte Abflachung im Stromprofil in der Nähe der resonanten Fläche die entsprechenden Tearing-Moden stabilisiert werden. Die von den resonanten helikalen Feldern erzeugten magnetischen Inseln führen zu einer lokal erhöhten Wärmeleitung und einer entsprechenden Abflachung im Temperatur- und Stromprofil. Qualitative Auswertung der entsprechenden Stabilitätskriterien zeigen, daß die in Pulsator erzeugten Inselgrößen zur Erklärung der beobachteten Stabilisierung ausreichen sollten. Mit einem Satz verschiedener helikaler Windungen unterschiedlicher Steigungen sollte eine bessere Auswahl der zu stabilisierenden Gebiete getroffen werden können.

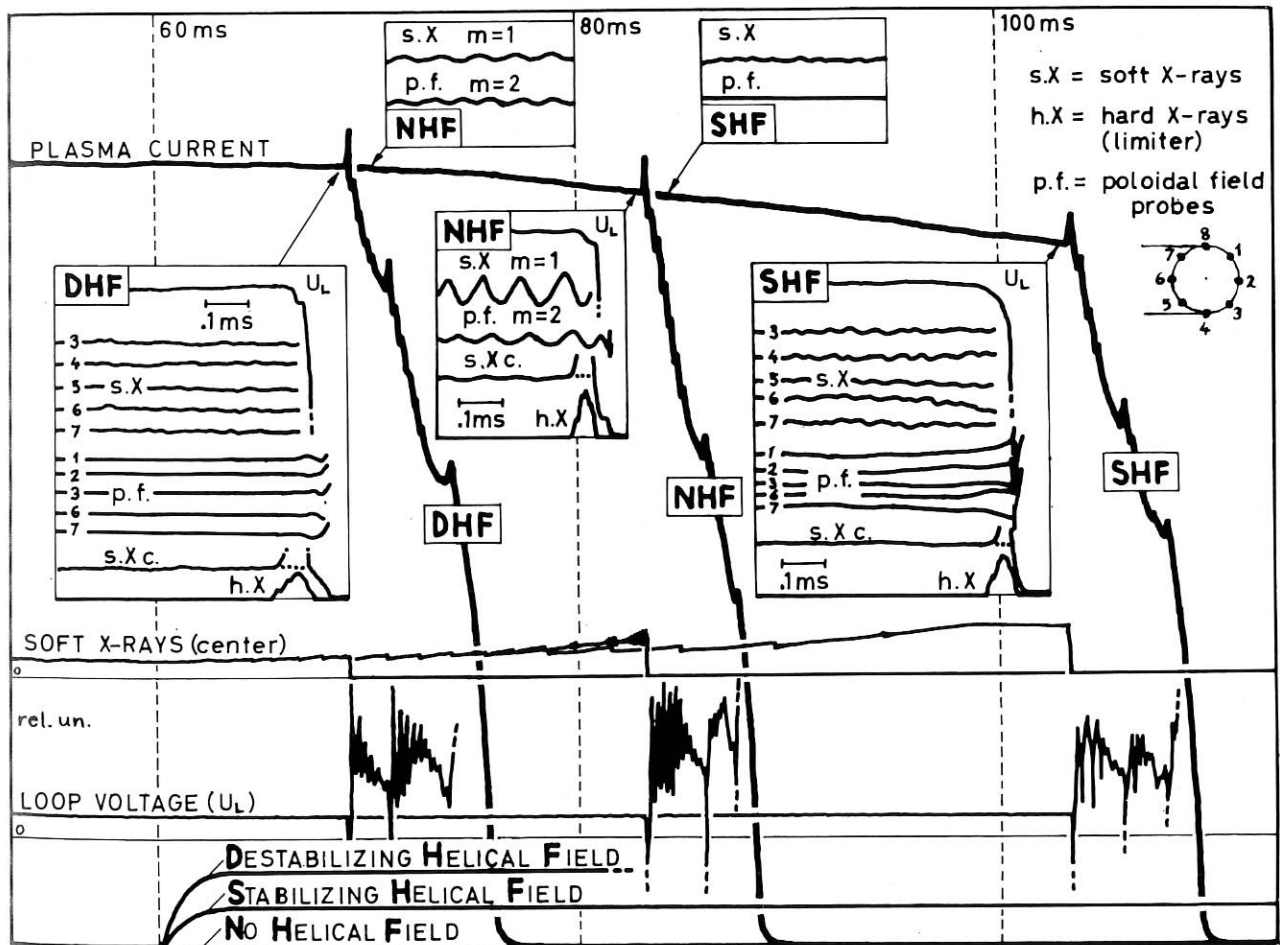


Abb. 3: Oszillogramme dreier verschiedener Stromabbrüche, die den Einfluß des äußeren resonanten helikalen $m = 2$ -Feldes zeigen. (DHF: Abbruch durch helikales Feld induziert, NHF: spontaner Abbruch ohne helikales Feld, SHF: Abbruch nach vorheriger Stabilisierung durch das helikale Feld)

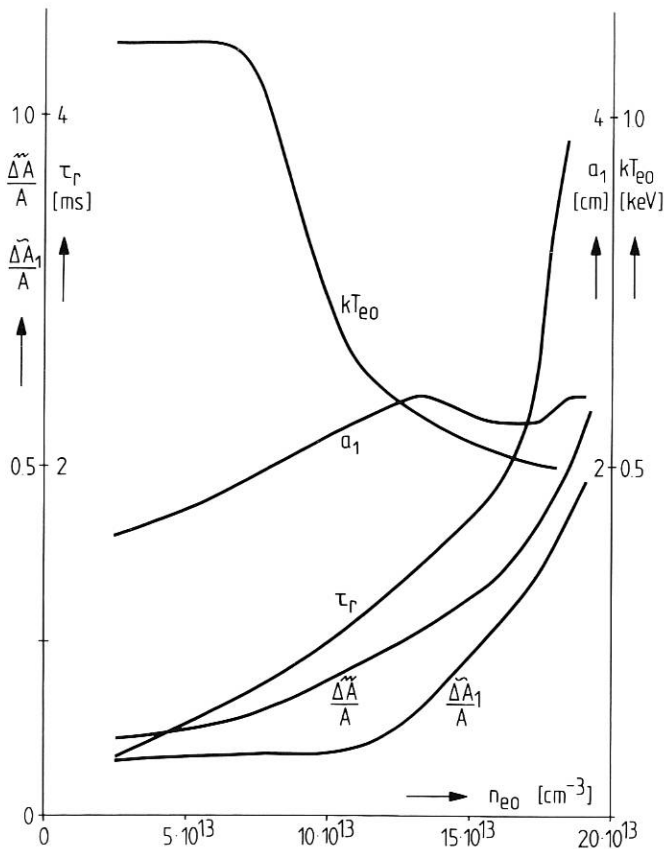


Abb. 4: Abhängigkeit der Elektronentemperatur in der Mitte T_{e0} , des Radius der $q = 1$ -Fläche a_1 , der Sägezahnperiode τ_r und der relativen Amplitude der Röntgensignale der internen Abbrüche $\frac{\Delta \tilde{A}}{A}$ (Sägezahn) und $m = 1$ -Mode $\frac{\Delta \tilde{A}_1}{A}$ von der Teilchendichte in der Mitte n_{e0} .

1.1.3 Interne Moden

Mit zehn Si-Dioden wurden die interne $m = 1, n = 1$ Mode sowie die damit zusammenhängenden internen Abbrüche (Sägezahnschwingungen $m = 0, n = 0$) untersucht. Die Abhängigkeit charakteristischer Größen der internen Moden von der Dichte wird in Abb. 4 gezeigt. Periodendauer und relative Amplitude der Sägezahnschwingungen wachsen stärker als linear mit der Dichte. Während die Frequenz der $m = 1$ Mode ungefähr gleich der diamagnetischen Driftfrequenz der Elektronen bleibt, wächst ihre relative Amplitude mit der Dichte.

Der maximal gemessene Elektronentemperaturabfall während eines internen Abbruchs beträgt 20%, während sich die Dichte um maximal 5% verringert. Für die Elektronenenergiebilanz innerhalb der $q = 1$ -Fläche ergibt sich daraus, daß weniger als $1/4$ der Ohm'schen Leistung (45 kW) innerhalb der $q = 1$ -Fläche durch den internen Abbruch nach außen geht. Der wichtigste Verlustmechanismus für die Elektronen innerhalb der $q = 1$ -Fläche ist damit im Hochdichteregime die Energieübertragung an die Ionen.

1.1.4 Untersuchungen zum Verständnis des Hochdichteregimes

a) Optimierung

Parameterstudien zeigten, daß bei maximalem Hauptfeld (2.7 T) der Strom nicht über 65 kA gesteigert werden kann: Die Entladungen werden für $q_3 < 3.5$ instabil. Die maximale erreichbare Dichte bleibt in diesem Fall unter 10^{14}cm^{-3} . Variation der q -Werte ist nur bei geringerem Strom möglich (40 kA). Dabei ergab sich praktisch keine Abhängigkeit der maximalen Dichte von q ($3 < q < 5.5$). Die erreichbare Dichte lag nur wenig unter den Werten der 65 kA-Entladung.

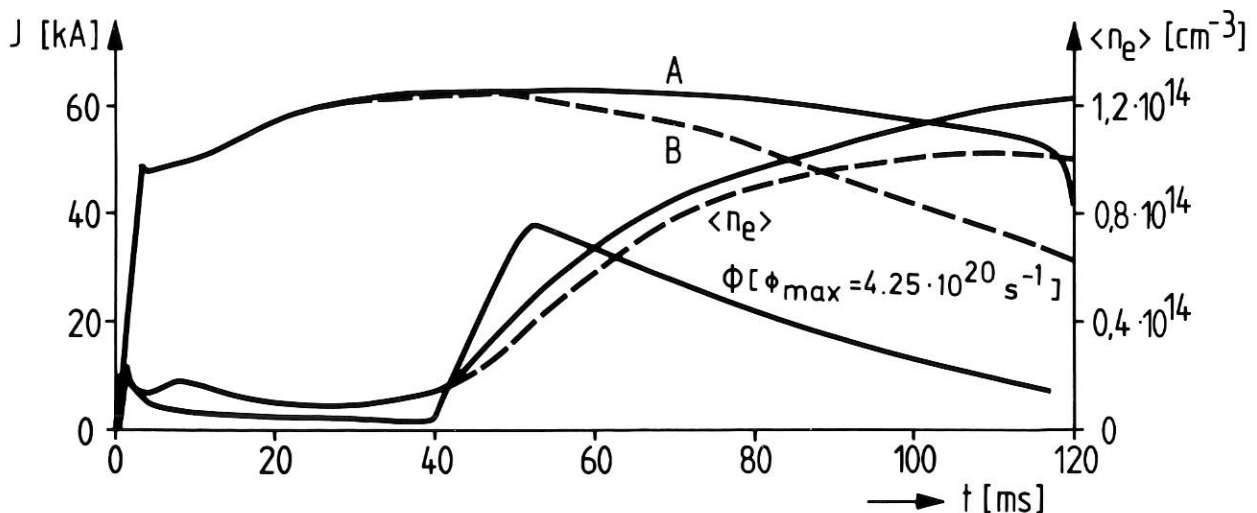
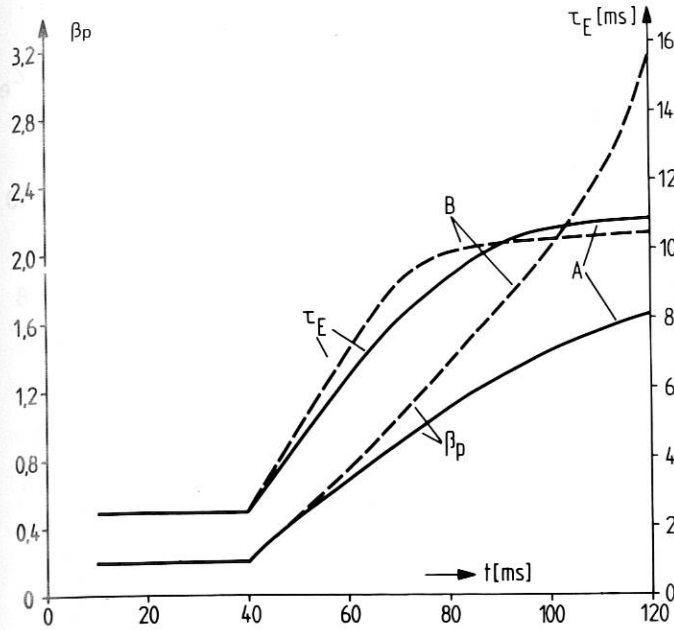


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf des Plasmastroms, der Linien-Elektronendichte $\langle n_e \rangle$ und des eingelassenen Neutralteilchenflusses Φ für zeitlich konstanten Plasmastrom (A) und für abfallenden Plasmastrom (B).



Damit erwies sich die 65 kA-Entladung mit $B = 2.7$ T und Gaseinlaß bei 40 ms als Optimum. Charakteristische Daten dieser Entladung werden in den Abbildungen 5–9 gezeigt. Die Entladungsdauer beträgt 120 ms, die maximale Dichte auf der Achse erreicht $2 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$. Gegen Ende dieser Entladung liegt β_p bei 1.5 (Abb. 5). Bei langsam abfallendem Strom (Abb. 5) ergaben sich β_p -Werte > 2 (Abb. 6). Dies entspricht einem absoluten β von 1% auf der Achse.

Die Energieeinschlußzeit τ_E ist proportional der Dichte, dasselbe gilt anfangs auch für die Teilcheneinschlußzeit τ_p (Abb. 7). Allerdings tritt hier eine Sättigung nach 20 ms ein. τ_p ist dann kleiner als τ_E , was auf starke Wechselwirkung des einströmenden Gases mit dem Plasma in einer kalten Randzone hinweist. Der

Abb. 6: Zeitlicher Verlauf des poloidalen β (β_p) und der Energieeinschlußzeit τ_E für die Fälle A und B in Abb. 5.

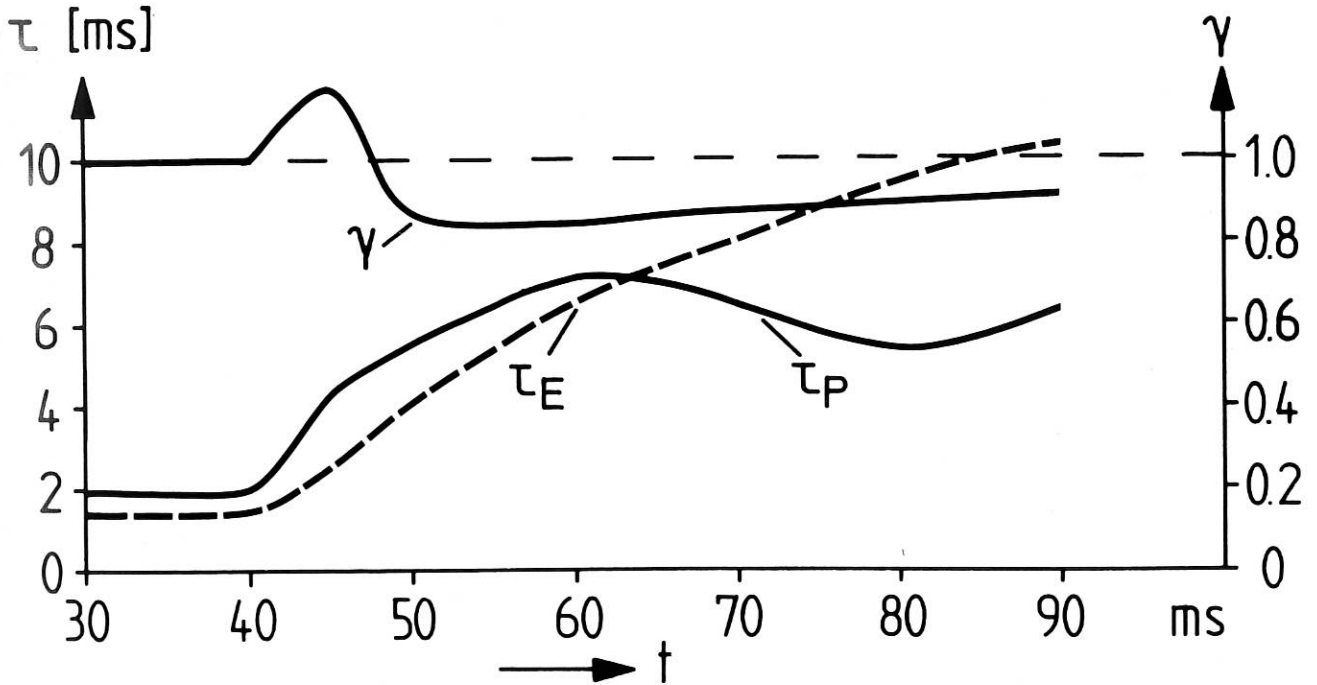


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Teilcheneinschlußzeit τ_p , der Energieeinschlußzeit τ_E und des Recyclingkoeffizienten.

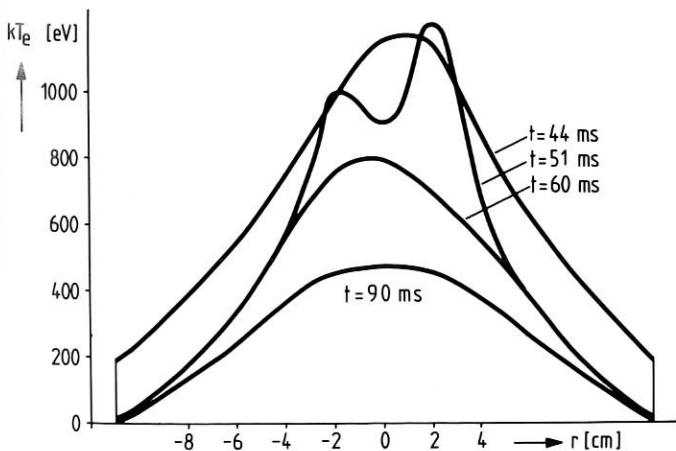
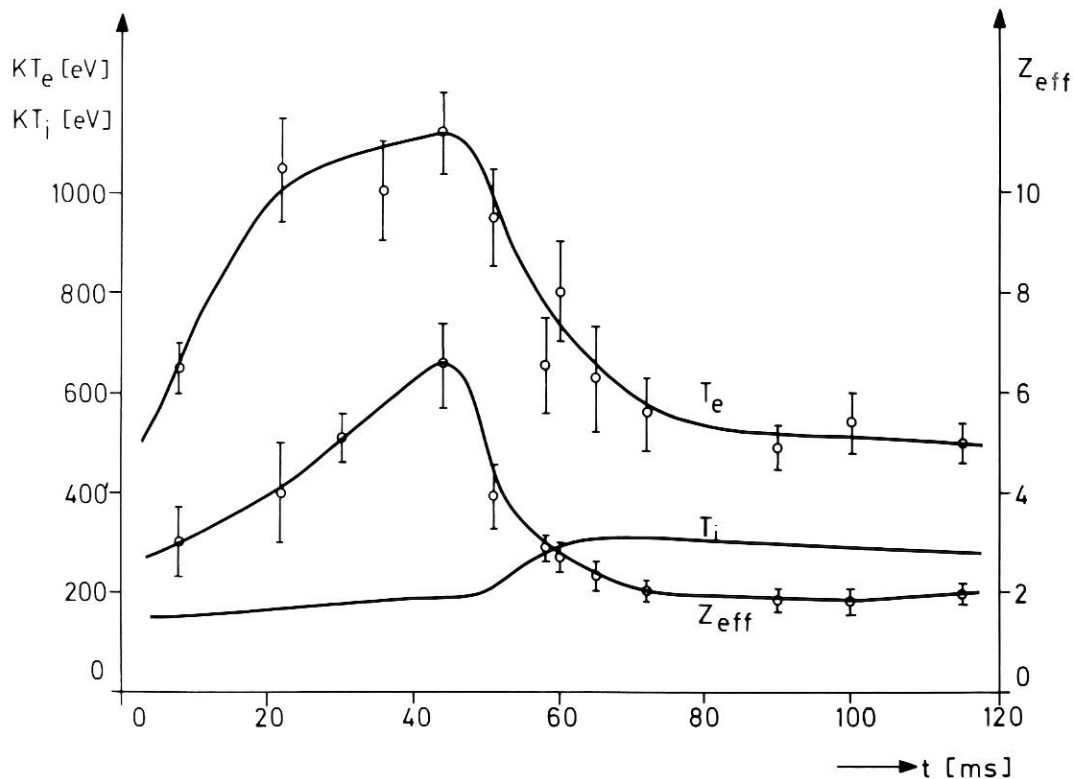


Abb. 8: Profile der Elektronentemperatur T_e zu verschiedenen Zeitpunkten t der Entladung.

Abb. 9:
Zeitlicher Verlauf
von Ionentemperatur T_i ,
Elektronen-
temperatur T_e
und Verunreinigungs-
faktor Z_{eff} .

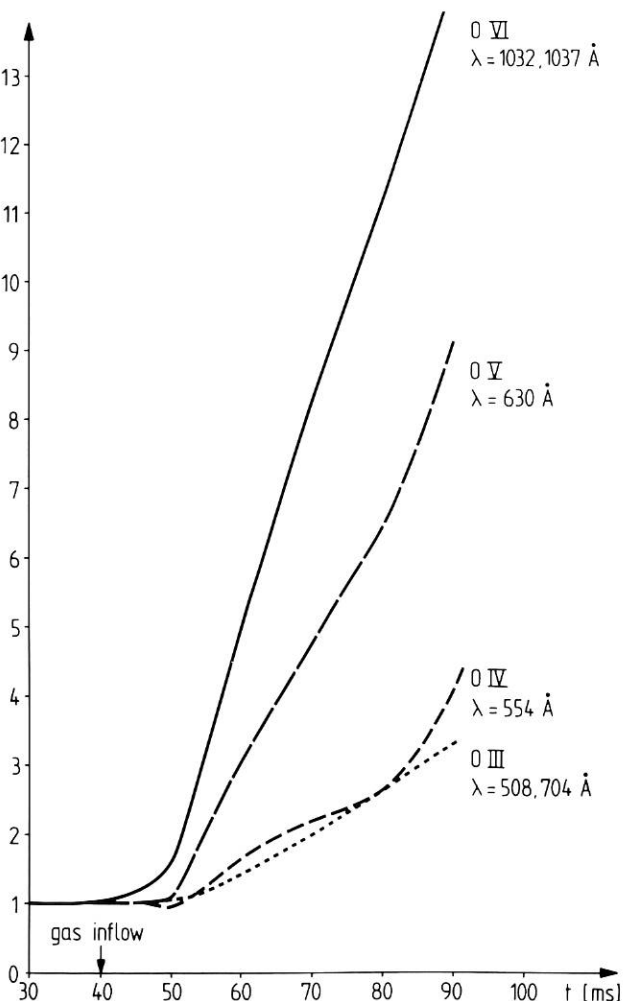


Recyclingkoeffizient γ liegt während des Gaseinlaßes nahe bei 1 (Abb. 7). Der Verunreinigungsgrad dieser Entladungen ist äußerst gering, Z_{eff} sinkt auf Werte unter 2, d.h. die Protonendichte beträgt mehr als 90% der Elektronendichte.

b) Verunreinigungen

Am Anfang der Entladungen kann die Sauerstoffkonzentration spektroskopisch absolut gemessen werden. Sie ist in Übereinstimmung mit den gemessenen Z_{eff} -Werten, d.h. Sauerstoff ist die hauptsächliche Anfangsverunreinigung. Während der Zeit bis zum Gaseinlaß steigt Z_{eff} durch Schwermetall-Verunreinigungen (Mo aus dem Limiter, Fe, Ni, Cr aus der Wand) auf Werte von 6 bis 8 (Abb. 9) an. Nach dem Gaseinlaß sinkt die absolute Dichte der schweren Verunreinigungen schnell um etwa den Faktor 3, so daß der Beitrag dieser Verunreinigungen zu Z_{eff} vernachlässigbar wird. Die Sauerstoffkonzentration kann zu diesem Zeitpunkt nicht mehr direkt gemessen werden; es ist lediglich möglich, den Fluß des einströmenden Sauerstoffs anzugeben. Nimmt man an, daß die Einschlußzeit für Sauerstoff dieselbe wie für Wasserstoff ist, so erhält man eine Konzentration, die bei 1.5% liegt. Dieser Wert ist konsistent mit den Z_{eff} -Werten von 1.7 bis 1.9 im Hochdichteregime, d.h. am Ende der Entladung ist der Sauerstoff wiederum die dominierende, allerdings jetzt sehr geringe Verunreinigung.

Abb. 10: Zeitlicher Verlauf der normalisierten Emissionen verschiedener Sauerstofflinien während des Gasinlasses.



Während des Neutralgasflusses wird ein starkes Ansteigen der Linienstrahlung der verschiedenen Sauerstoffionen beobachtet (Abb. 10). Dies kann zum größten Teil durch Rekombination in den äußeren Schichten der Plasmasäule erklärt werden, die sich dort bei zunehmender Dichte stärker abkühlt. Zu späteren Zeiten (vor dem Abbruch) werden ca. 20% der Ohm'schen Leistung durch Sauerstofflinien vom Plasma abgestrahlt.

Aus den Messungen der weichen Röntgenstrahlen (ζ -Faktor, L-Linien von Mo und Fe) geht hervor, daß es keine Anhäufung von schweren Verunreinigungen in der Mitte gibt, wie es aufgrund von Ergebnissen der neoklassischen Diffusion vermutet wurde. Vielmehr deuten verschiedene unabhängige Messungen auf ein schwach invertiertes Profil der Schwermetalle hin. Nur unter dieser Annahme sind die Bestimmungen des q -Profils aus den Thomson-Streumessungen und den internen Abbrüchen miteinander kompatibel.

c) Neutralteilchenanalyse

1976 konnten orts aufgelöste Spektren des Neutralteilcheneinflusses erhalten werden. Bezüglich der Änderung entlang des großen Torusumfangs ergab sich eine Erhöhung des Teilchenflusses um den Faktor 6...7 am Ort des Gaseinlasses weitgehend unabhängig von der Teilchenenergie.

Die Analyse der Änderung des Flusses über den kleinen Radius ergab Profile von vergleichsweise hoher Symmetrie um die Mitte. Diese Symmetrie ist in Tokamaks mit ausgeprägter Welligkeit nicht zu finden, da dort der größte Teil der analysierten Ionenpopulation „gefangen“ ist und voll der vertikalen $\nabla B \times B$ -Drift unterliegt. Die hohe Symmetrie der Flußkurven und damit der geringe Fehler bei der Temperaturbestimmung in der Mitte ist bei PULSATOR demnach auf die geringe Hauptfeldwelligkeit zurückzuführen. Abb. 11 zeigt das aus den Flußkurven erhaltene Temperaturprofil der schnellen Umladungsneutralen. Bemerkenswert ist, daß diese Temperatur am Plasmarand auf dem hohen Wert von 190 eV bleibt. Eine Erklärung dafür wäre, daß die gemessenen Teilchen nicht vom Plasma der Randzone sondern aus dem Plasmazentrum nach Reflexion an Teilen der Gefäßwand in den Analysator gelangen. Das Plasma sollte demnach von einer Corona heißer Neutralteilchen umgeben sein. Die Klärung dieser Frage ist wichtig zum Verständnis der Transport- und Recycling-Vorgänge vor allem im Hochdichteregime.

d) Runaway-Elektronen

Während der Anfangsphase der Entladung können runaways mit einer maximalen Energie von ca. 1 MeV auf den Liner treffen. Dieser runaway-Verlust ist insbesondere beim Durchfahren ganzzahliger q -Werte zu beobachten und ist auf die Ausbildung magnetischer Störungen an der Plasmaoberfläche zurückzuführen.

Nach etwa 5...10 ms haben die meisten der während der Zündphase gebildeten runaways das Plasma bereits wieder verlassen, und die Intensität der harten Röntgenstrahlung weist zu dieser Zeit ein Minimum auf.

Danach steigt mit zunehmender Temperatur die runaway-Produktion rasch an, bis sie durch den Gas-einlaß innerhalb von ca. 5 ms vollständig gestoppt wird.

Da praktisch keine neuen runaways mehr entstehen, liegen nun besonders günstige Verhältnisse für die Untersuchung des Einschusses der verbliebenen runaways vor. Die Messungen ergeben eine Einschlußzeit von etwa 10 ms. Zum Zeitpunkt der Abbruchinstabilität (s. o.) gehen die – nunmehr allesamt hochenergetischen runaways ($\epsilon > 6$ MeV) – innerhalb eines sehr kleinen Zeitintervalls (einige 10^{-6} s) an den Limiter.

1.15 Lithium-Strahl-Diagnostik (Poloidalfeldmessung)

Durch Messung der Polarisationsrichtung der Zeeman-aufgespaltenen, stoßangeregten Resonanzlinie des Lithiums wird das poloidale Magnetfeld nach Richtung und Größe bestimmt. Das gesamte System (Ionenquelle, Neutralisator, optischer Aufbau) wurde im Oktober 1976 am PULSATOR montiert. Bei einer Strahlenenergie von 8 keV konnte ein Li^9 -Strom von ca. $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ im Torus erzielt werden (Strahlhalbwertsbreite: ca. 2 cm).

Die ersten vorläufigen Messungen zeigen das prinzipielle Funktionieren des Verfahrens. Es ist derzeit limitiert durch die Intensität des Li-Strahls und damit durch die Anzahl der im Stoß gebildeten Photonen, die aber noch um eine Größenordnung über der Photonenzahl liegt, die im gemessenen Frequenzbereich vom Plasmaleuchten herrührt. Mit einer größeren Serie reproduzierbarer Plasmaschüsse kann das Profil des Poloidalfeldes aufgenommen werden.

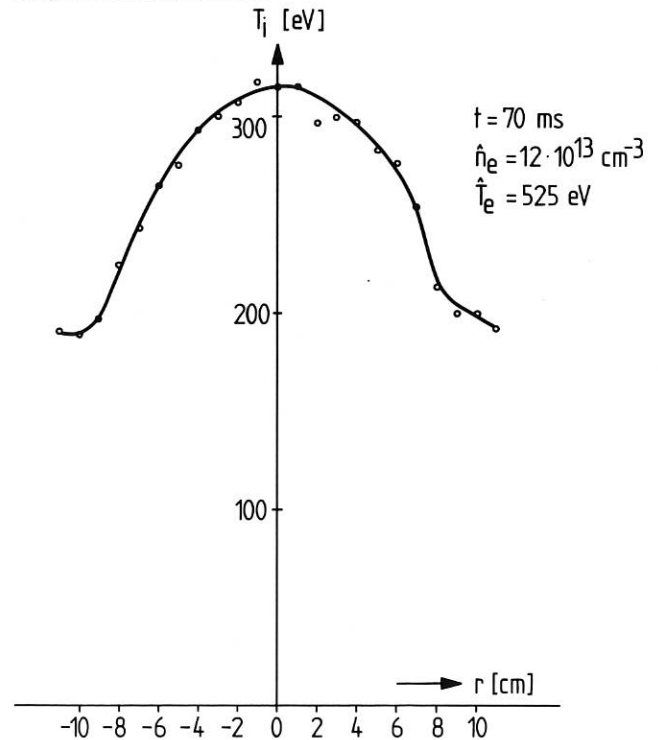


Abb. 11: Aus der Analyse der schnellen Austauschneutralen gewonnenes Profil der Ionentemperatur T_i .

1.1.6 Pellet-Füllung

(in Zusammenarbeit mit Projekt LPQ)

Ziel der Füllung mit Pellets am PULSATOR ist, die Nachteile der Kaltgasfüllung vom Rand her (Kühlung der Randzonen) durch Einbringen einer Teilchenquelle ins Innere des Plasmas zu vermeiden. Zu diesem Zweck wird das Plasma gezündet, wenn sich das Pellet bereits innerhalb des Entladerohres befindet.

Die Montage der Pelletstromquelle am PULSATOR wurde Mitte 1976 begonnen. Erste vorläufige Experimente zeigen, daß die Stabilität des Plasmas durch die neue Füllmethode nicht beeinträchtigt wird und daß nach schneller Erosion die vom Pellet herstammende Füllsdichte mit einer Zeitkonstante von ca. 20 ms abfällt (für nähere Einzelheiten vgl. Projekt LPQ).

1.2 PML

Der PML-Torus ist mit Multipolspulen und einem Satz von helikalen Windungen unterschiedlicher Steigungen versehen. Er ist zum Einbau in das toroidale Magnetfeld von PULSATOR vorgesehen.

Mit den Multipolspulen ist eine magnetische Limitierung des Plasmas in ASDEX-ähnlicher Konfiguration möglich. Die helikalen Windungen mit den Steigungen $q = 1; 1,5; 2; 3$ erlauben eine Ausdehnung der zur Zeit am PULSATOR auf $q = 2$ beschränkten Untersuchungen mit resonanten helikalen Feldern. Diesen Experimenten kommt in Hinblick auf die Stabilisierung der Abbruchinstabilität (z. B. durch Stromprofiländerung) und im Zusammenhang mit der Möglichkeit der helikalen statt poloidalen magnetischen Limitierung und Divertierung von toroidalen Plasmen besondere Bedeutung zu.

Im Jahre 1976 wurden am PML-Torus die wesentlichen mechanischen Arbeiten geleistet. Mit der endgültigen Fertigstellung ist 1977 zu rechnen.

1.3 Theorie

Für eine Klasse exakter Gleichgewichtslösungen wurde eine systematische Untersuchung der lokalen Stabilität D-förmiger (z. B. JET) und PDX-artiger Konfigurationen gegen ideale und resistive Moden durchgeführt. Variation von Aspektverhältnis, Elliptizität und Triangularität dieser toroidalen Plasmagleichgewichte innerhalb weiter Grenzen hat u. a. die folgenden Resultate erbracht:

- 1) Stabilität bezüglich lokaler idealer und resistiver Moden sollte im ganzen Plasmavolumen geprüft werden, denn bei der Auswertung der entsprechenden Kriterien (des Mercier-Kriterien (des Mercier-Kriteriums und seiner Erweiterung auf resistive Effekte) wurde gefunden, daß achsenstabile Gleichgewichte weiter außen im Radius instabil sein können und auch durch Erhöhung des q -Wertes auf der Achse nicht stabilisiert werden.
- 2) D-förmige Konfigurationen sind bezüglich der betrachteten Moden stabiler als Anti-D-förmige.
- 3) Anti-D-förmige Konfigurationen bezüglich lokaler Moden durch kleineres Aspektverhältnis stabiler gemacht werden.

2. Projekt ASDEX

(M. Keilhacker)

Im Tokamak-Experiment ASDEX soll untersucht werden, ob die in derzeitigen Plasmaeinschlußexperimenten für eine Extrapolation zum Reaktor untolerierbare hohe Konzentration an Verunreinigungen, die durch Desorption und Zerstäubung an den Gefäßwänden entstehen, durch einen magnetischen Divertor wesentlich reduziert werden kann. Um ein in Temperatur und Dichte möglichst reaktorrelevantes Plasma erzeugen zu können, ist neben Ohm'scher Heizung eine Heizung durch Neutralinjektion vorgesehen. Zur Teilchennachfüllung im Divertorbetrieb ist an eine Kombination aus Neutralinjektion, Clusterinjektion und Kaltgaseinlaß gedacht.

Hier wird zunächst über den technischen Aufbau des Experiments berichtet. Der zweite Abschnitt behandelt physikalisch-theoretische Überlegungen zur Wirkungsweise eines Divertors, zur Zusatzheizung und Teilchennachfüllung und zur Plasmastabilität. Der dritte Abschnitt schließlich beschäftigt sich mit der Vorbereitung der Diagnostik für ASDEX.

2.1 Aufbau des Experiments

Das Jahr 1976 war durch den Übergang von der Fertigung zur Montage gekennzeichnet. Nach Fertigstellung der notwendigen Bauarbeiten in der Halle L 6 konnte der Aufbau von Gerüst und Hauptfeldspulen im Juli begonnen und bis zum Januar 1977 abgeschlossen werden. Parallel dazu verlief die Montage des Heiz- und Kühlsystems, sowie die Fertigung des Vakuumpfäßes, der OH-Spulen und der Stromrichter für das Vertikalfeld. Die restlichen Komponenten wurden projektiert und vergeben (Vakuumsystem, Divertor Kühl- u. Heizsystem, Multipolspulen, Datenerfassung) oder können in der ersten Hälfte 1977 vergeben werden (Steuerung, Divertorpumpsystem, OH-Schalter).

2.1.1 Hauptfeldspulen und Gerüst

(E. Broser, H. Niedermeyer, H. Dietrich, G. Herppich, Th. v. Larcher, F. Wesner)

Das Gerüst wurde nach der Fertigung, Probemontage und Funktionsprüfung durch die Buderus'schen Eisenwerke termingerecht im Juni 1976 geliefert. Ebenfalls termingerecht erfolgte im Berichtszeitraum die Herstellung und Lieferung der Hauptfeldspulen / 52 / durch BBC-Oerlikon.

Nach Fertigstellung des Fundaments, der Unterzüge für die Diagnostikbühne und der Strahlenschutzmauer konnte im Juli 1976 mit dem gemeinsamen Aufbau von Gerüst und Hauptfeldspulen begonnen werden. Bis zum Januar 1977 waren alle 16 Hauptfeldspulen montiert (Abb. 12).

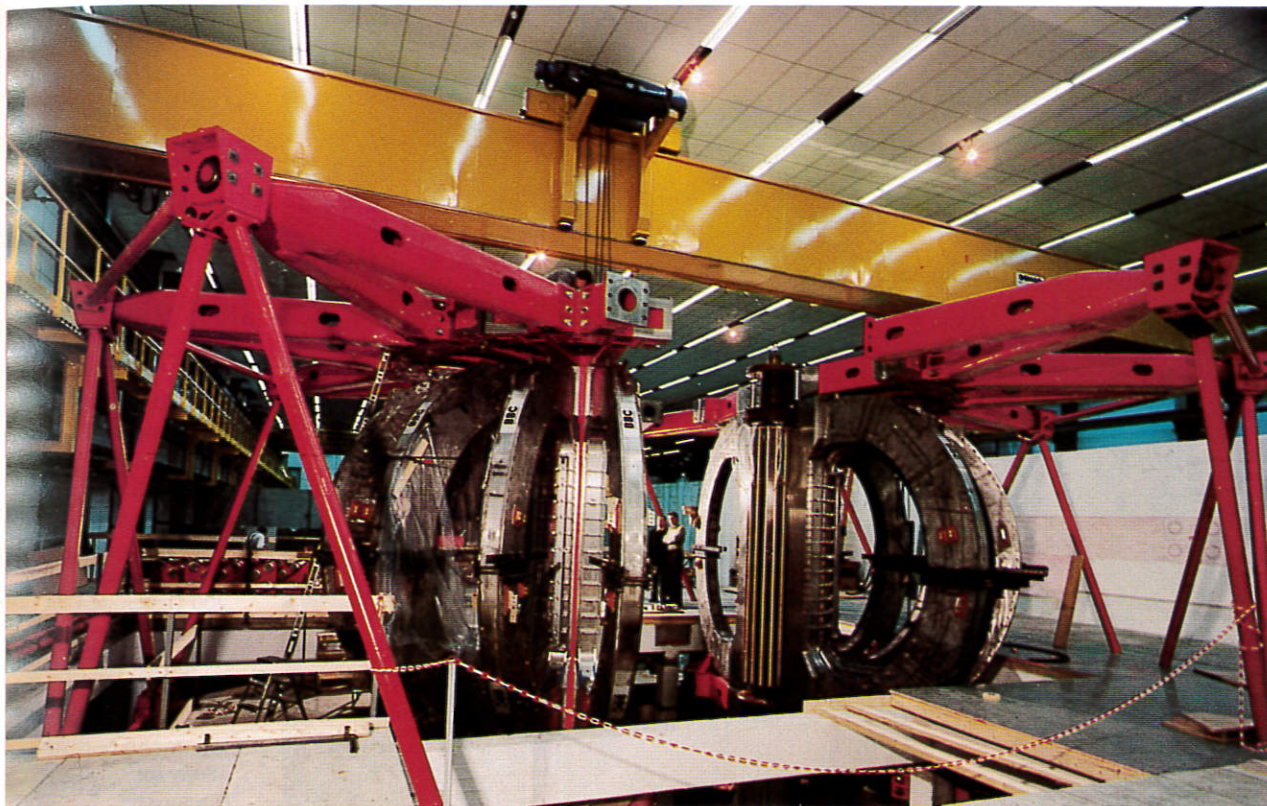


Abb. 12: Fertig montiertes Hauptfeldspulensystem von ASDEX mit mechanischer Stützkonstruktion beim „Verfahrtest“. Die Hälfte des Spulensystems mit der zugehörigen Stützkonstruktion kann 3 m verfahren werden, um das Vakuumgefäß und die Poloidal­feldspulen in den Hauptfeldspulen montieren zu können. In der Mitte ist die Stützsäule aus verleimtem Festholz zu erkennen.

Im April 1976 wurde der Hochstromtest der Prototypspule durchgeführt. Stromstärke und Pulsdauer wurden so gewählt, daß die thermische Belastung und die mechanische Schubbeanspruchung der Spule den Auslegungsdaten entsprach. Dabei wurde auch die programmierte Abkühlung der Spule erprobt. Bei den 300 durchgeführten Pulsen traten keinerlei Mängel der Spulen auf.

Bis zum Ende des Berichtsjahres wurde die Konstruktion der elektrischen Verschaltung des Spulensystems, der Kühlwasserverteilung und der Überwachungseinrichtungen für Spulen und Gerüst fertiggestellt. Die zu erwartenden Störungen des Magnetfeldes wurden mittels des Programms HEDO (*H. Preis, P. Martin*) berechnet. Die Vermessung des Feldes mit Hilfe eines Elektronenstrahls bei der für April 1977 vorgesehenen Inbetriebnahme des Spulensystems wurde vorbereitet (*P. Krüger*).

2.1.2 Vakuumgefäß

(*R. Allgeyer, H. Kotzlowski, J. Franzspeck, O. Jandt*)

Nach der Auftragsvergabe (an Leybold-Heraeus) sowie dem Erschmelzen und Walzen des Materials im Jahre 1975 wurde das Vakuumgefäß im Berichtszeitraum aus den einzelnen Zylindern, Konen und Deckplatten zusammengesweißt und nach dem Trennen in zwei

Hälften spannungsarm gegläht. Zum Jahresende konnte dann die spanabhebende Bearbeitung abgeschlossen werden (Abb. 13). Die Auslieferung des Gefäßes wird im März 1977 erwartet.

Parallel dazu wurde die Konstruktion der Gefäßeinbauten (Spanten, Multipolhalterungen, Multipolabschirmungen, Trennsplattendeckungen, Divertorabdeckplatten, Hilfslimiter, Feedback-Stabilisierungsleiter usw.), der Gefäßhalterung sowie aller Montagevorrichtungen durchgeführt und im wesentlichen abgeschlossen. Mit der Konstruktion der Diagnostikeinbauten wurde begonnen.

Die Auswirkungen eines Betriebs mit nicht-kreisförmigen Plasmaquerschnitten auf die mechanische Beanspruchung des Gefäßes und der Einbauten wurde mit finite-element-Rechnungen untersucht.

2.1.3 Vakuumsystem

2.1.3.1 Äußeres Vakuumsystem

(*W. Poschenrieder, H. Finkelmeyer*)

Nachdem bereits Ende 1975 die acht großen Turbomolekularpumpen (Turbovac 3500) bestellt worden waren, konnte nach der Ausarbeitung der technischen Unterlagen im Juli 1976 der Fertigungsauftrag für das gesamte System einschließlich Steuerung an Balzers vergeben werden.

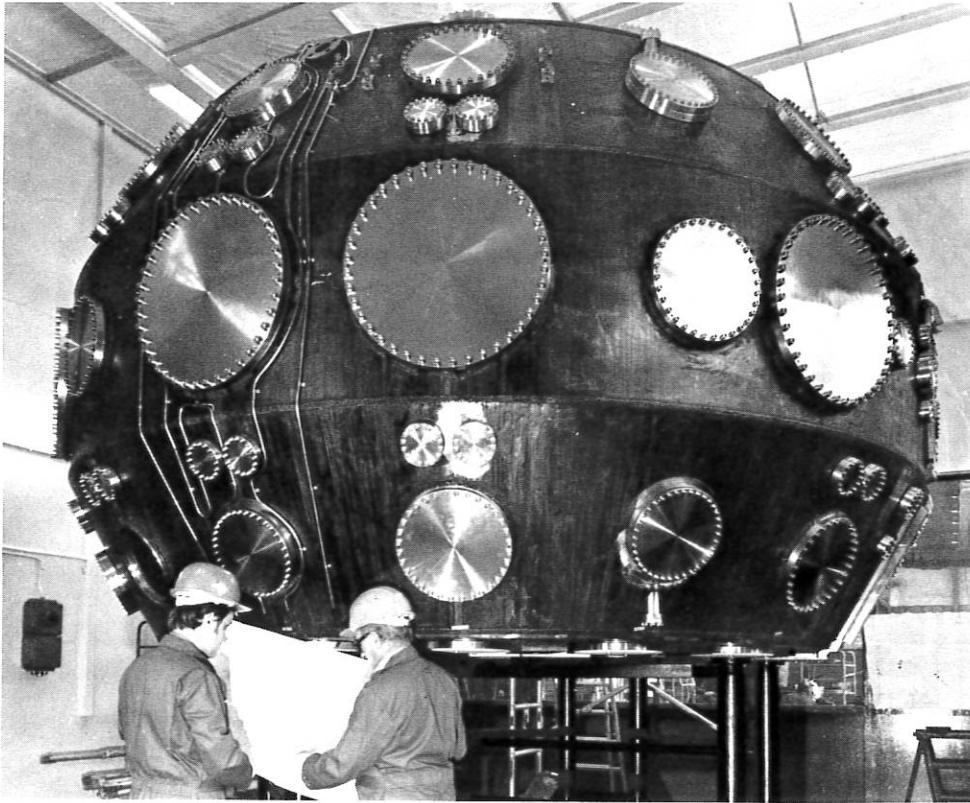


Abb. 13:
Vakuumgefäß von
ASDEX nach
Abschluß der
mechanischen
Bearbeitung.
Die insgesamt über
200 Öffnungen im
Gefäß dienen zur
Neutralinjektion, zum
Pumpen, für
verschiedene Durch-
führungen und vor
allem zur
Diagnostik.

2.1.3.2 Divertorpumpsystem

(G. Haas, F. Wagner)

Im Februar 1976 wurde entschieden, für das Divertorpumpsystem / 58 / Ti-Sublimationspumpen und keine Volumengetterpumpen einzusetzen (vgl. Jahresbericht 1975, S. 36/37). Für die Ti-Sublimationspumpen sprach vor allem, daß nur mit ihnen die erforderliche Saugleistung von 6×10^6 l/s sicher erreicht werden kann und der Experimentierbetrieb durch sie nicht eingeschränkt wird.

Im Berichtszeitraum wurde ein Titan-Verdampfertyp mit 19 parallel geschalteten Ti-Mo-Drähten entwickelt / 58 /.

Die Entwicklung der LN_2 -gekühlten Divertoreinsätze (Getterflächen) wurde abgeschlossen und ein Prototyp in Auftrag gegeben. Das Stickstoff-Kühl- und Heizsystem zur Temperatursteuerung der Getterflächen konnte im Dezember 1976 nach der Ausarbeitung der technischen Unterlagen bei Linde in Auftrag gegeben werden.

An einer Modell-Divertorkammer wurden die Eigenschaften des Pumpsystems durch massenspektrografische Messungen während der verschiedenen Betriebsphasen der Getterpumpe, durch Bestimmung von Saugleistung und Pumpkapazität sowie durch Untersuchung der Haftfestigkeit der Titanhydridschichten untersucht.

2.1.4 OH-Transformator; Vertikalfeld- und Multipolkompensationsspulen

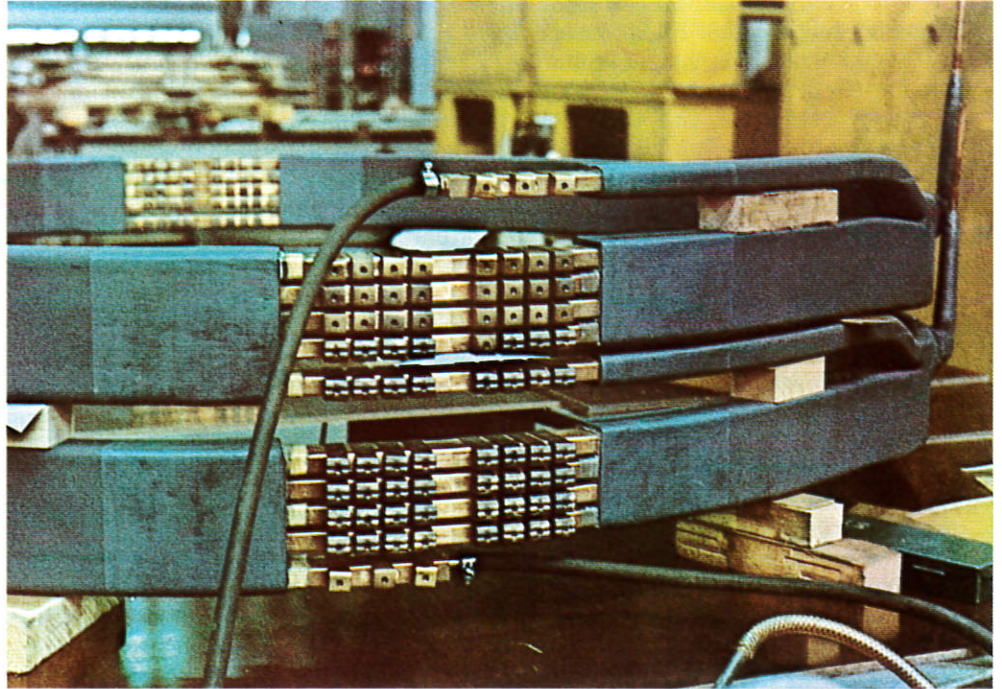
(H. Wedler, G. Klement, E. v. Mark, H. Preis, F. Wesner)

Der Auftrag für die Fertigung der 24 OH-Spulen wurde im Januar 1976 an BBC-Mannheim vergeben (Abb. 14). Zur endgültigen Festlegung der Fertigung mußten bei BBC und im IPP u. a. noch Versuche zur Ausführung der Isolation an den Spulenüberstiegen und Kontaktstellen sowie zur mechanischen Bearbeitung der Zahnkontakte durchgeführt werden.

Schwierige Probleme waren bei der Konstruktion der Spulenhalterung und -verspannung zu lösen, wo große Kräfte unter beengten Raumverhältnissen aufgenommen werden müssen. Weiter mußte die Montagemöglichkeit der OH-Spulen durch zeitaufwendige Modellversuche nachgewiesen werden. Diese Arbeiten sowie die Konstruktionsarbeiten für die Vertikalfeld- und Multipolkompensationsspulen wurden nahezu abgeschlossen.

In einem Prüfkreis zur Stromabschaltung im OH-Transformator konnte durch 188 Abschaltungen von 30 kA gegen 20 bis 24 kV (Lichtbogenzeit 3 ms) ohne Erneuern des Kontaktsatzes nachgewiesen werden, daß ein serienmäßiger Druckluftschalter (AEG-Bahn-schalter) selbst für 30 kA-Abschaltungen prinzipiell verwendbar ist.

Abb. 14:
OH-Spule mit
fünf Windungen.
Im Vordergrund
die Zahnkontakte
zur Verbindung
der Spulenhälften.



2.1.5 Multipolspulen

(M. Pillsticker, F. Hartz, O. Jandl, P. Krüger,
F. Werner, F. Wesner)

Das im Jahresbericht 1975 (S. 37/38) erwähnte Spulenkonzep mit rechteckförmigen Windungsquerschnitten wurde bis zur Fertigungsreife entwickelt / 62 /. Neben den Entwurfsarbeiten wurden dazu vor allem folgende Vorversuche und Rechnungen durchgeführt:

- Die lösbaren Verbindungen der Halbspulen wurden unter simulierten Betriebsbedingungen getestet. Die Tests ergaben befriedigende Ergebnisse für die mechanische Festigkeit, die aus der Strombeanspruchung resultierende Temperaturbelastung und die Lebensdauer, wenn im Verbindungsbereich geeignete Cu-Legierungen eingesetzt wurden.
- An Cu und Cu-Legierungen wurden Elektronenstrahlschweißversuche und Hartlötversuche vorgenommen. Die Versuche zeigten, daß bei der Herstellung aller nicht-lösbaren Leiterverbindungen Hartlötungen angewandt werden können.
- Für die mechanisch überaus kritisch beanspruchten Leiterverbindungen und Stromzuleitungen wurden detaillierte Festigkeitsrechnungen durchgeführt.

Im Dezember wurde der Fertigungsauftrag an BBC-Mannheim vergeben.

Parallel zu den oben genannten Arbeiten wurde mit der Konstruktion der relativ komplizierten Montagevorrichtungen begonnen.

2.1.6 Heiz- und Kühlsystem

(M. Kornherr)

Anfang 1976 konnten die technischen Unterlagen für den Elektroteil des Heiz- und Kühlsystems fertiggestellt werden. Er enthält u. a. die Steuerungslogik zum automatischen Ablauf der Programme, die von der zentralen ASDEX-Steuerung anwählbar sind, sowie die Verriegelungslogik zum Schutz des Experimentes vor den Auswirkungen von Fehlern im Heiz- und Kühlsystem.

Nach getrennten Ausschreibungen des Elektro- und Maschinenteils konnte im April 1976 das Gesamtsystem an Mannesmann vergeben werden. Der Elektroteil wird im Unterauftrag von Siemens erstellt.

In Zusammenarbeit mit Mannesmann wurden dann die Regelkreise berechnet und die Regelarmaturen ausgewählt. Im September 1976 begann die Montage. Die Fertigstellung wird im Frühjahr 1977 rechtzeitig zur Inbetriebnahme des Hauptfeldspulensystems und zum Ausheiztest des Vakuumgefäßes erwartet.

2.1.7 Energieversorgung

(H. Rapp, F. Gresser)

Auf der Basis der erweiterten Energieversorgungseinrichtungen, die noch 1975 vom IPP in Auftrag gegeben worden waren, wurden im Berichtszeitraum weitere Komponenten projektiert, ausgeschrieben und z.T. in Auftrag gegeben, mit deren Hilfe das flexible Energie-

angebot genutzt und die verschiedenen Schaltkreisvariationen der ASDEX-Spulensysteme verwirklicht werden können:

- Ein Kreuzschienenverteiler, der die Parallelschaltung, Polumkehr und Umverteilung der von den neuen Thyristor-Stromrichtern ankommenden Leitungen auf die Vertikalfeld-, Toroidalfeld- und Multipolspulen ermöglicht.
- Eine „Leitungszelle“, in der unmittelbar unter dem Experiment die Schaltung der einzelnen Spulenstromkreise durch Laschenverbindungen erfolgt.
- Verbindungsleitungen bis zur Leitungszelle, die ungekühlt mit 4-Leiterkabeln bzw. Stromschienen ausgeführt werden.

Um das Ausmaß der von den Thyristor-Stromrichtern zu erwartenden Störungen abschätzen zu können, wurde an einem 6-pulsigen Modell-Stromrichter (200 V / 40 A) das Frequenzspektrum gemessen. Es fällt bei ungünstigster Aussteuerung bis 50 kHz kontinuierlich ab und besitzt bei 100 kHz ein Maximum mit -34 dBV, bezogen auf die Leerlaufspannung. Nach Inbetriebnahme der Stromrichtermodule in L5E sind weitere Messungen und Versuche zur Dämpfung der Oberwellen geplant.

Für die Radialfeld-Versorgung wurde nach Festlegung der Multipol-Betriebsarten ein linearer 4-Quadranten-Steller für ± 60 V, ± 4 kA in Brückenschaltung und Modulbauweise konzipiert. Ein Prototyp-Modul wird in den Zentralen Technischen Einrichtungen der IPP entwickelt und gebaut. Für kurzzeitige Pulsströme bis 12 kA ist eine Kondensatorbatterie mit 50 kJ, 600 V vorgesehen.

An weiteren Arbeiten wurden u. a. für die wassergekühlten Spulen die aufgrund der Erwärmung maximal zulässigen Werte für Strom und Zeit und die notwendige Energie berechnet, sowie erste Abschätzungen der Transformatorgröße für 50 Hz-Reinigungsentladungen durchgeführt.

2.1.8 Feedback-System

(F. Schneider, F. Gresser, K. Lackner)

Die theoretischen Untersuchungen zur Optimierung der Vertikalfeld- und Radialfeld-Regelkreise wurden weitgehend abgeschlossen / 76 /. Die für die Realisierung erforderlichen Regelemente wurden bestellt und sind größtenteils geliefert.

Die Programmsteuereinheit wurde unter Zuhilfenahme von Elementen der Datenverarbeitungsanlage entwickelt und als Prototyp fertiggestellt und erprobt.

Die genaue Erfassung der Plasmalage soll durch eine Kombination der Messung des poloidalen Flusses zwischen Schleifen am inneren und äußeren Rand des Entladungsraumes mit den an denselben Stellen gemessenen Magnetfeldern erfolgen. Dies ermöglicht die Bestimmung der radialen Lage des geometrischen Plasmamittelpunktes ohne Kenntnis der inneren Plasmaparameter (β_p , I_i) und ohne Benutzung der Shafranov'schen Gleichgewichtsformel und der damit verbundenen Annahmen. Die entsprechenden Detektoren, Vorverstärker und Kompensationsschaltungen wurden entwickelt.

Bei den Überlegungen zur erzielbaren Regelgenauigkeit und -geschwindigkeit des Systems mußte u. a. berücksichtigt werden, daß schnelle Feldänderungen nur am Spalt eindringen. Diese erheblichen lokalen Feldverzerrungen wurden am 1:10-Modell gemessen. Erste numerische Untersuchungen des resultierenden Feldverlaufs am Plasma zeigten, daß die Flußflächen dadurch kurzzeitig um einige Zentimeter aus der Rotationssymmetrie ausweichen.

2.1.9 Modellmessungen elektrodynamischer Verkopplungen

(F. Schneider)

Am 1:10-Modell von ASDEX wurden die Spulensysteme ergänzt und das Gefäß mit den Einbauten versehen. Dadurch konnten die dynamischen Regelkreisparameter und die geometrischen Feldverzerrungen in Abhängigkeit der Zeit genauer ermittelt werden. Insbesondere wurden aber auch die bei Plasmaabrisß auftretenden Überspannungen an den einzelnen Spulenwindungen sowie die Induktionsströme in verschiedenen Gefäßteilen und Abdeckblechen gemessen. Die dadurch bedingten mechanischen Belastungen der einzelnen Elemente ließen sich daraus berechnen und bei der Konstruktion der Originalteile berücksichtigen.

2.1.10 Zentrale Steuerung

(H. Rapp, R. Griek)

Die Aufgabe der Zentralen Steuerung ist es, durch Ausgabe von Steuerbefehlen an die verschiedenen Hilfs- und Untersysteme unter Beachtung der empfangenen Meldungen und eingestellten Parameter einen sinnvollen und sicheren Betrieb von ASDEX zu ermöglichen.

Die von der Zentrale an die Untersysteme abgehenden Steuerbefehle und die entsprechenden Rückmeldungen (Schnittstellen) sowie die logischen Verknüpfungen zwischen den Befehlen und Rückmeldungen verschiedener Untersysteme (Schnittstellensteuerungen) wurden festgelegt. Parallel dazu wurden sieben Hauptzustände des Experiments definiert und die dazugehörigen Programmbefehle und Rückmeldungen der Untersysteme zusammengestellt. Für die 4 dynamischen Hauptzustände (normaler Experimentierbetrieb, 50 Hz-Reinigungsentladung, Pulse-Cleaning und sog. „freier“ Experimentierbetrieb) wurden charakteristische Programmabläufe angefertigt.

In Diskussionen – u. a. auch mit der Industrie – ergab sich, daß das zentrale Steuerwerk als frei programmierbare Steuerung ausgeführt werden sollte. Eine festverdrahtete Verknüpfungssteuerung ist für die Sicherheitsüberwachung vorgesehen. Ein eigener Kleinrechner soll die Protokollierung aller eingestellten Betriebsparameter, der Steuerbefehle, Meldungen sowie von zusätzlichen ablaufspezifischen Meßwerten übernehmen.

Gegen Jahresende wurde mit der Anfertigung der Unterlagen für die Ausschreibung begonnen, die im Februar 1977 erfolgen soll.

2.1.1 Magnetfeldberechnungen

(H. Preis, P. Martin)

Neben der routinemäßigen Berechnung der Felder, Kräfte und Induktivitäten für die Entwicklungsarbeiten an ASDEX mit vorhandenen Programmen wurden hauptsächlich folgende Programme erweitert bzw. neu entwickelt:

- Zur Erstellung von Feld- und Niveaulinienbildern und zur Ermittlung der Flußdichteverteilung des ASDEX-Magnetsystems wurden Subroutinen entwickelt, die an die Programme HEDO (Feldberechnung für beliebige Spulenordnungen) und KOSPHOS (Feldberechnung für axialsymmetrische Spulenordnungen) angeschlossen werden können.
- Die Programme zur Berechnung von Feldern, Kräften und Induktivitäten, die bisher nur für rechteckige Wicklungsquerschnitte ausgelegt waren, wurden auf kreisförmige Querschnitte erweitert.
- Um Schaltvorgänge (Kurzschlüsse, Disruptions, Abschaltvorgänge, Überspannungs-Schutzeinrichtungen u. a.) im elektrischen Netzwerk von ASDEX berechnen zu können, wurde mit der Neuentwicklung eines Computerprogramms für die Analyse transients Vorgänge in elektrischen Netzwerken begonnen.

2.2 Physikalisch-theoretische Untersuchungen

2.2.1 Einfluß des Divertors auf die Plasmaverunreinigungen

(G. Haas, M. Keilhacker)

Die Untersuchungen zum Einfluß eines Divertors auf die Plasmaverunreinigungen wurden fortgeführt. Mittels eines einfachen Randschichtmodells, in dem die Plasmadiffusion quer zum Magnetfeld den Plasmaperlust entlang des Magnetfeldes in den Divertor gleichgesetzt wird, wurden für ASDEX typische Werte der Plasmadichte an der Separatrix n_s , der Randschichtdicke Δ und der vom Produkt $n_s \Delta$ abhängenden Wahrscheinlichkeit für die Ionisierung der Verunreinigungen in der Randschicht abgeschätzt [64]. Es zeigte sich, daß trotz einer relativ dünnen Randschicht ($\Delta \approx 1$ cm, n_s einige 10^{12} cm $^{-3}$) die Ionisierungswahrscheinlichkeit für leichte Verunreinigungen (C,O) etwa 0.5 und die für schwere Verunreinigungen (Mo,W) nahezu 1 ist. Zusammen mit der zu erwartenden Herabsetzung des Recycling durch den Divertor sollten demnach die Verunreinigungen um 1 bis 2 Größenordnungen reduziert werden können.

Ein Teil dieses positiven Effekts geht durch die notwendige Plasmanachfüllung wieder verloren. Deshalb wurde in weiteren Rechnungen der Einfluß verschiedener Nachfüllmethoden (Kaltgaseinlaß, Clusterinjektion, Neutralinjektion) auf die Divertoreffektivität untersucht [60]. In diesen Rechnungen wurden außerdem die bisher nicht berücksichtigte Zerstäubung an den Prallplatten durch Metallionen, die in der Potential-schicht zwischen Prallplatten und Plasma beschleunigt werden, mitgenommen. Die weitaus geringste Plasmaverunreinigung durch Zerstäubung der Wand oder der Prallplatten ergab sich bei Nachfüllung mit Kaltgas. Das ist verständlich, da die in allen drei Fällen bei der Absorption unvermeidlichen Umladungsneu-

tralen bei Kaltgaseinlaß aus der relativ kalten Randschicht, bei Clusterinjektion und Neutralinjektion aber aus dem heißen Kern des Plasmas stammen.

2.2.2 Verbreiterung der Abschältschicht durch helikale Ströme

(W. Feneberg)

Bei der für ASDEX vorgesehenen Divertorkonfiguration stellt sich außerhalb der Separatrix eine relativ dünne Abschältschicht ein, die nur einen Teil der von der Wand kommenden Verunreinigungen absorbiert (siehe vorangegangenen Abschnitt). Es wurden Rechnungen durchgeführt, die zeigen, daß sich diese Randschicht durch Aufbringen einer äußeren helikalen Wicklung (z. B. $\ell = 3$), die in Resonanz mit einer in der Nähe der Separatrix gelegenen magnetischen Fläche ist, wesentlich verbreitern läßt. Dies beruht darauf, daß das Feld einer helikalen Wicklung in toroidaler Geometrie auch Störfelder erzeugt, die mit höheren Werten von q , die zwischen der Grundmode und dem Plasmarand liegen, in Resonanz kommen. Dadurch entstehen Inseln, die sich überlappen, und die Feldlinien werden ergodisiert. Da dieser Prozeß andererseits wegen der erhöhten Verluste entlang der Feldlinien zu einer Verringerung der Plasmadichte führt, muß noch durch genauere Rechnungen geprüft werden, wie er sich insgesamt auf die Absorption von Verunreinigungen auswirkt.

Ferner wurden Rechnungen durchgeführt, ob sich der Effekt dieser zusätzlichen Abschältschicht nicht bereits im Experiment PULSATOR prüfen läßt. Die dort vorhandenen $\ell = 2$ -Wicklungen lassen sich nämlich so mit Strom beschicken, daß ein $m = 4$, $n = 2$ -Feld entsteht, dessen Stärke mit hoher Potenz nach innen abfällt. Mit Hilfe dieses Feldes ist es möglich, die magnetischen Flächen zwischen $q = 2.5$ und dem Plasmarand zu zerstören, während im Inneren des Plasmas die Flächen erhalten bleiben. Auf diese Weise kann eventuell sehr einfach ein magnetischer Limiter erzeugt und der Einfluß der Randschicht auf die Plasmaverunreinigungen untersucht werden.

2.2.3 Heizung und Nachfüllung

(G. Haas, M. Keilhacker)

2.2.3.1 Heizung durch Neutralinjektion

Zusätzlich zur Ohm'schen Heizung (0,5–1 MW) ist für ASDEX eine leistungsstarke Heizung durch Neutralinjektion vorgesehen [59]. Damit soll zum einen der Parameterbereich von Plasmadichte und -temperatur vergrößert werden, in dem die Wirkungsweise des Divertors untersucht werden kann. Zum anderen soll versucht werden, durch kontrollierte Deposition der Injektionsleistung in bestimmten Plasmabereichen Temperatur- und Stromprofile gezielt zu beeinflussen.

Zur Festlegung der für diese Ziele günstigsten Parameter für die Injektoren wurden im Projekt Neutralinjektion ausführliche Rechnungen zur Leistungs-, Teilchen- und Verunreinigungsbilanz durchgeführt, über die im Beitrag dieses Projekts (Seite 00) im einzelnen berichtet wird. Mit den für die vier Injektoren (Einschuß tangential zum Hauptfeld) angestrebten Parametern (Beschleunigungsspannung 40–50 kV, extrahierter

Strom pro Quelle 40 A, Pulslänge 0.2–1 s) sollte die im Plasma absorbierte Heizleistung etwa 2,5 MW, also ein Mehrfaches der Ohm'schen Heizleistung, betragen.

2.2.3.2 Mit Zusatzheizung erreichbare β -Werte

In diesem Zusammenhang wurden Abschätzungen durchgeführt, welche β -Werte in ASDEX bei bestimmten zusätzlichen Heizleistungen zu erwarten sind (in Zusammenarbeit mit R. Wilhelm, Bereich Hoch-Beta-Plasmen). Geht man von einer Skalierung der Energieeinschlußzeit $\tau_E \sim n a^2$ und der kritischen Dichte $n_k \sim (P_{ohm} + P_{zus})^{1/2} / (Z_{eff} - 1)^{1/2} / A$. Gibson, Nucl. Fusion 16, 546 (1976) / aus und paßt die Skalierungsgesetze z. B. an PULSATOR-Werte an, so zeigt sich, daß man für $Z_{eff} = 2$ mit einer zusätzlichen Heizleistung P_{zus} von 2–3 MW $\beta_p \approx 1$ und mit 6–7 MW $\beta_p \approx A$ erreichen sollte. Diese Werte gelten für das maximale ASDEX-Hauptmagnetfeld. Bei niedrigerem Magnetfeld können bei gleicher Zusatzheizung höhere β -Werte erzielt werden.

2.2.3.3 Nachfüllung

In heutigen Tokomaks beträgt die Entladungsdauer aufgrund des Recycling ein Mehrfaches der Teilcheneinschlußzeit. Geht man davon aus, daß ein Divertor das Recycling größtenteils unterbindet, so muß für einen quasistationären Betrieb der gesamte Plasmaverlust durch Nachfüllung ersetzt werden. Bei ASDEX beträgt der für die Plasmanachfüllung benötigte Teilchenstrom etwa 200 Å. Davon würde die Neutralinjektion bei den oben genannten Injektionsparametern einen Teilchenstrom von etwa 35 Å liefern, also nur einen kleinen Teil. Es ist deshalb geplant, als weitere Nachfüllmethode die im IKVT Karlsruhe entwickelte Clusterinjektion einzusetzen / 59 /. Bei einer für den Clusterinjektor angestrebten Beschleunigungsspannung von 1 MeV, einem elektrischen Strom von 0.1 Å und einer mittleren Clustergröße von 1000 Atomen würde der äquivalente Teilchenstrom 100 Å, die mittlere Energie der nachgefüllten H-Atome 1 keV betragen. Zur vollständigen Teilchennachfüllung ist an eine Kombination aus Clusterinjektion, Neutralinjektion und Kaltgaszufuhr gedacht.

2.2.4 Neutralgasfüllung

(G. Siller)

Zur Füllung des Vakuumgefäßes mit Neutralgas vor dem Zünden des Plasmas sind vier auf dem Gefäßumfang verteilte Ultraschalldüsen vorgesehen. Mit einem Computerprogramm, das einzelne Teilchenbahnen verfolgt, wurden die räumliche Verteilung der Neutralgasdichte im Gefäß und die Teilchenverluste durch die Divertorschlitze in Abhängigkeit von der Zeit berechnet. Parameter waren der Einschubwinkel der Ultraschalldüsen und die Länge der Neutralgasimpulse.

Die wesentlichen Ergebnisse sind:

Bezüglich der Impulslänge erreicht man bei vorgegebener Gesamtteilchenzahl mit kurzen Neutralgasimpulsen hoher Intensität schneller Homogenität als mit langen Impulsen geringer Intensität. Die Teilchenverluste bis zu Homogenisierung liegen zwischen 5 und 15%. Bei tangentialen Einschub ist die Homogenisie-

rungszeit etwa um 1 ms länger als bei senkrechtem Einschub. Das Einströmen ohne Ultraschalldüse, d. h. ein Quellenöffnungswinkel von 180° gegenüber etwa 10° mit Ultraschalldüse, ergibt zwar eine geringfügige Verkürzung der Homogenisierungszeit, scheidet aber wegen zu geringem Gasdurchsatz aus.

2.2.5 Axisymmetrische Instabilitäten

(K. Lackner)

Ein im Jahre 1975 entwickelter Code zum Test allgemeiner, numerisch berechneter Tokamak-Gleichgewichte gegen axisymmetrische Instabilitäten wurde verbessert und angewandt / 71 /. Die Rechnungen bestätigten den stabilisierenden Effekt eines abnehmenden Aspektverhältnisses und klärten den Einfluß der Plasmastromverteilung. Während das Stabilitätsverhalten elongierter Querschnitte – erzeugt durch ein äußeres Quadrupolfeld – von der Stromverteilung weitgehend unabhängig ist, haben in der Mitte konzentrierte Stromprofile einen stabilisierenden Einfluß für Plasmaquerschnitte, die durch äußere Multipolfelder höherer Ordnung erzeugt werden. Da dieser stabilisierende Effekt mit zunehmender Ordnung der Multipolfelder wächst, soll für optimales, axisymmetrisches Stabilitätsverhalten ein Divertortokamak möglichst lokalisierte Divertorfelder haben. (Bei der für ASDEX gewählten Divertorkonfiguration wurde dieser Gesichtspunkt berücksichtigt.) Die gefährlichste Phase der Entladung in einem Divertortokamak stellt daher der Stromaufbau dar, da in dieser Phase die Stromverteilung flacher und das Aspektverhältnis größer ist.

2.3 Vorbereitung der Diagnostik

2.3.1 Standard-Diagnostik

(W. Engelhardt¹⁾, G. Fußmann, O. Gehre, J. Gernhardt, E. Glock¹⁾, F. Karger¹⁾, O. Klüber, M. Kornherr, G. Lisitano¹⁾, H. M. Mayer¹⁾, K. McCormick¹⁾, D. Meisel¹⁾, R. Müller, H. Murmann, S. Sesnic¹⁾, F. Wagner)

Unter Standard-Diagnostik werden hier alle Verfahren verstanden, die bereits an derzeit im Betrieb befindlichen Tokamak-Anlagen eingesetzt sind. Sie lassen sich aufteilen in

- elektrische und magnetische Messungen (Strom, Ringspannung, Plasmalage, poloidaler und diamagnetischer toroidaler Fluß)
- Interferometrie (Elektronendichte)
- Thomson-Streuung (Elektronentemperatur und -dichte)
- Spektroskopie vom Sichtbaren bis ins harte Röntgengebiet (Kontinuum- und Linienstrahlung liefert u. a. Energieverteilung der Elektronen, Ionisationsrate, Strahlungsverluste durch Verunreinigungen)
- Bolometrie (Gesamtenergiefluß durch Strahlung und Teilchen)
- aktive und passive Neutralteilchendiagnostik (Ionen-temperatur, Neutralteilchenfluß)
- Modenmessungen (MHD-Aktivität)

¹⁾ Projekt PULSATOR

Bei der Adaption für ASDEX waren vor allem zwei Punkte zu beachten: Zum einen ist der Zugang durch die Multipolleiter und die Divertorkammern im Vergleich zu klassischen Tokamaks erheblich eingeschränkt. Zum anderen mußte Wert darauf gelegt werden, die zur Erhaltung der entsprechenden Information nötige Schußzahl möglichst gering zu halten. Das macht für mehrere Verfahren den Einsatz aufwendiger Mehrkanalsysteme erforderlich.

Ausgehend von einem zu Beginn des Berichtsjahres vorgelegten Vorschlag wurde die Verteilung der Diagnostikvorrichtungen um die Maschine festgelegt, die Kompatibilität mit Multipolleitern und Divertoreinsätzen geklärt und der Platzbedarf ermittelt. Die Auslegung aller Systeme ist soweit abgeschlossen, daß mit der Konstruktion begonnen werden kann.

2.3.2 Entwicklung spezieller Diagnostikmethoden

Weitere in der Entwicklung befindliche Verfahren sind für den Einsatz an ASDEX vorgesehen. Dabei handelt es sich um die z. Zt. an PULSATOR in Erprobung befindliche Lithiumstrahl-Methode (vgl. Beitrag PULSATOR!) sowie um resonante und fast resonante Streuverfahren (vgl. Beitrag Bereich Hoch-Beta-Plasmen!). Die Streumessungen sollen detailliertere Auskunft über die Neutralteilchendichteverteilung und über das Verhalten der Randschicht liefern. Vom Projekt Plasma-Wand-Wechselwirkung wurde ein Vorschlag für die randschicht- und wandspezifische Diagnostik erarbeitet, der u. a. einen Ausbau des bereits an PULSATOR und TRF erprobten QWAASS-Verfahrens vorsieht.

2.3.3 Datenerfassung (N. Ruhs)

Nachdem der Umfang der vorgesehenen Diagnostiken festgelegt war, konnte die vom Datenerfassungsrechner geforderte Leistungsfähigkeit abgeschätzt werden. Es werden je Schuß – d. h. alle vier bis sechs Minuten – von etwa 20 Diagnostiken insgesamt etwa 270.000 Bytes Meßdaten erwartet.

Ein Großteil dieser Daten soll unmittelbar nach dem Schuß ausgewertet werden, so daß die für die Fortführung des Experimentierbetriebes wichtigen Informationen noch vor dem nächsten Schuß zur Verfügung stehen. Bei dieser Sofortauswertung können auch z. T. Fehler in den Diagnostikgeräten erkannt werden, so daß die Experimentatoren die Möglichkeit haben, diese sofort zu beheben.

Der geplante Rechner vom Typ PDP 11/70 soll mit etwa zehn Bildschirm-Terminals ausgestattet werden, auf denen automatisch die Ergebnisse der Standardauswertungen grafisch dargestellt werden, wahlweise aber auch interaktive Auswertungen möglich sind. Umfangreichere Auswertungen sollen über eine Datenleitung an der Großrechenanlage des IPP durchgeführt werden.

3. Elektroniklabor

3.1 PULSATOR

Das gelieferte 16-Kanal-Transientrecordersystem wurde für die Anforderungen von PULSATOR umgebaut (Verbesserung der Temperaturstabilität, Nullpunktanzeige, Ermöglichung der Rechnerlesbarkeit, Rechner-Interface, Camac-Anschluß). Erst dadurch war eine genaue Analyse der Abbruchinstabilität möglich. Zur erweiterten Untersuchung des Stabilitätsverhaltens der PULSATOR-Entladung wird das Transientrecordersystem mit einem externen 1,2 M byte-Speicher versehen. Dazu wurde die Ansteuer- und Auswerte-Elektronik sowie Data-Strobe mit Code-Wandler vom Transientrecorder-ADC auf externen Speicher fertiggestellt, so daß 1977 ein sofort auslesbares Transientrecordersystem mit einer kleinsten Zeit-Auflösung von 1 μ s über eine Dauer von 64 ms (64.000 Punkte) auf 16 Kanälen zur Verfügung stehen wird.

Abgesehen von der Unterstützung des laufenden Betriebes an PULSATOR wurden die Meßelektronik für die Neutralteilchendiagnostik aufgebaut und Steuerungen für die Lithium-Strahl-Diagnostik, Pellet-Synchronisation und den gepulsten Gaseinlaß (5 Stufen) entwickelt und gefertigt.

3.2 ASDEX

Außer der umfangreichen Mitarbeit bei der Planung von ASDEX und der vorgesehenen Diagnostikeinrichtungen wurde für ASDEX der Prototyp eines Timers entwickelt und gebaut, der eine erheblich größere Flexibilität (seriell \rightarrow parallel) als der PULSATOR-Timer gewährleistet.

3.3 W VII A

Das für W II gefertigte System für Puls-Höhen-Analyse wurde an W VII A adaptiert und in Betrieb genommen.

4. Wellen im Plasma

(H. Derfler, O. Gehre, F. Leuterer, A. L. Peratt*),
H. M. Mayer, M. Porkolab**), S. Puri, M. Tutter, R. Watterson***)

Ziel der Arbeiten der Wellengruppe – bis Ende 1975 im Bereich „Laserfusion und Wellenheizung“ – 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 später zur Kontrolle der Heiz- und Transportprozesse in experimentellen Fusionsmaschinen dienen.

*) Gast vom Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif., USA

**) Gast von der Princeton University, Princeton, N. J., USA

***) Gast von der Stanford University, Stanford, Calif., USA

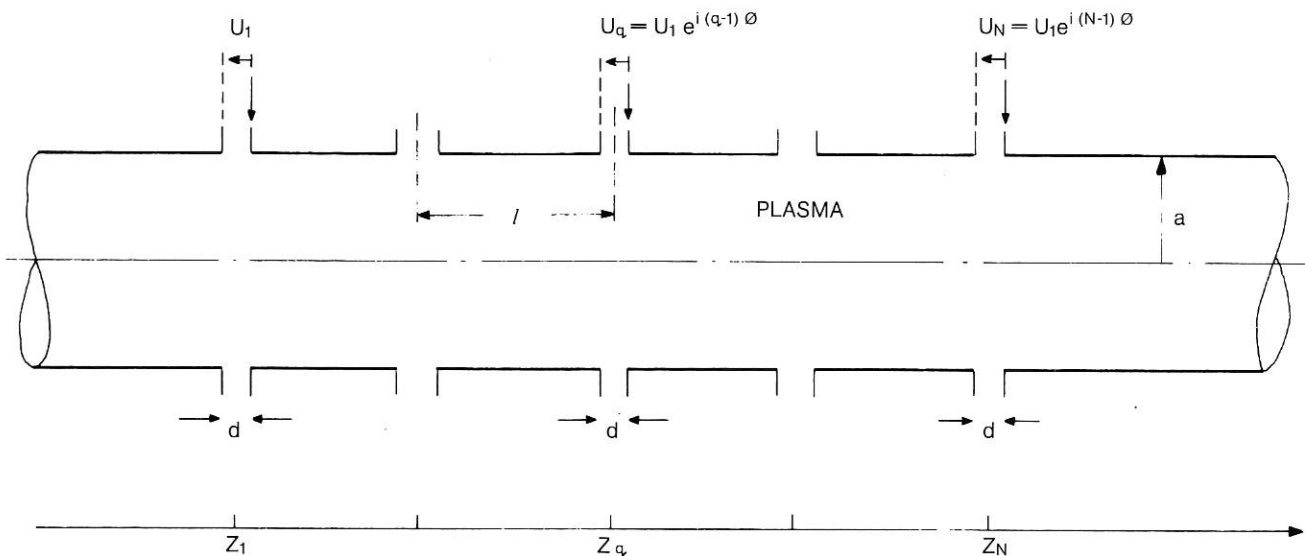


Abb. 15: Anregung von Plasmawellen durch äquidistante Spalten. ϕ = Phasenverschiebung pro Sektion der angelegten Hochfrequenzspannung U_1 .

4.1 Theorie der Wellenausbreitung im Plasma

4.1.1 Relativistische Dispersionstheorie

Zum Studium der von heißen Magnetoplasmen emittierten Synchrotronstrahlung wurde zunächst die relativistische Dispersionstheorie durch Zulassung anisotroper Temperaturen erweitert. Dabei sind T_{\parallel} und T_{\perp} relativ zu der Geschwindigkeitsrichtung zu messen, welche sich nach dem Einstein'schen Additionsgesetz aus der $E_0 \times B_0$ -Drift und der Drift parallel zu B_0 ergibt. Bei Ausbreitung längs dieser Vorzugsrichtung erhält man drei unabhängige Dispersionsbeziehungen für drei Grundwellen, nämlich eine elektrostatische Landau-Welle und je eine links- bzw. rechtszirkular polarisierte elektromagnetische Welle / 82 / 83 / 84 /. Bei senkrechter Ausbreitung ist eine Spaltung der Dispersionsbeziehung in drei Faktoren bisher nicht gelungen, obwohl wir im nicht relativistischen Falle die Existenz von drei Grundwellen nachweisen konnten; darunter eine elektrostatische Bernsteinwelle und je eine elektromagnetische Welle mit ordentlicher bzw. außerordentlicher Polarisationsrichtung / 94 / 85 /. Durch eine entsprechende Lösung der relativistischen Dispersionsbeziehung wird gegenwärtig die Anregung von Synchrotronstrahlung durch Drift und anisotrope Temperaturen untersucht.

4.1.2 Spaltanregung von Plasmawellen

Nachdem der Simultanbetrieb mehrerer Hochfrequenzgeneratoren zur Plasmaheizung in künftigen Fusions-

$$P = U_1^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g^2(k_n d)}{8Z_n} \left\{ f^2(q, \phi + k_n l) - f^2(N - q, \phi - k_n l) + i 2 f(q, \phi + k_n l) \cdot f(N - q, \phi - k_n l) \sin \left[2k_n z - \left(\frac{N}{2} + q \right) k_n l + \left(\frac{N}{2} + 1 \right) \phi \right] \right\}, \quad (2)$$

Wobei der Faktor $f(q, x) = \sin(q \cdot x / 2) / \sin(x / 2)$ die Interferenzen der von den Spalten emittierten Wellen beschreibt / 88 /. Links, bzw. rechts der Struktur ist $q = 0$, bzw. $q = N$, und P proportional zu $f^2(N, \phi \pm k_n l)$.

experimenten unumgänglich ist, wurde das Studium der Spaltanregung von Wellen im plasmagefüllten Hohlleiter auf N äquidistante Spalten (Abb. 15) ausgedehnt. Dabei konnten alle den Hochfrequenzingenieur zur Dimensionierung interessierenden Daten durch zwei Größen ausgedrückt werden. Das sind die achsialen Wellenzahlen der radialen Schwingungsmoden, k_n , und deren Wellenimpedanzen, $Z_n = 2 P_n / i_n l^2$, welche durch den achsialen Leistungsfluß, P_n , und den Wandstrom, i_n , definiert sind. So läßt sich die Wechselwirkung mehrerer Hochfrequenzgeneratoren durch die Matrix der Transadmittanzen

$$i_p = \sum_q Y_{pq} \cdot U_q, \quad Y_{pq} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2Z_n} g^2(k_n d) e^{i k_n |z_p - z_q|}, \quad (1)$$

beschreiben, wobei der „Modulationsfaktor“ $g = \sin(x / 2) / (x / 2)$ das Fourierspektrum des elektrischen Feldes in einem Einzelspalt approximiert / 86 /. In der Regel tritt am Rande des Plasmas eine Resonanzschicht auf, wo die lokale Plasmafrequenz mit der Senderfrequenz übereinstimmt, $\omega_p(r) = \omega$, $r < a$. In diesem Falle wachsen die Wellenimpedanzen, Z_n , mit steigender Ordnungszahl, n , sehr rasch an, so daß nach Gleichung (1) nur wenige Moden angeregt werden. Damit werden auch die Resonanzkegel, längs denen sich die Energie im Plasma ausbreitet, sehr stark verwaschen / 87 /.

Der achsiale Leistungsfluß zwischen zwei Spalten berechnet sich aus

Diese in Abb. 16 dargestellte Funktion nähert sich für große N einer Serie von Deltafunktionen, so daß man durch geeignete Wahl der Phasenverschiebung, $\phi + k_n l = 2\pi$, bestimmte Moden bevorzugt anregen kann.

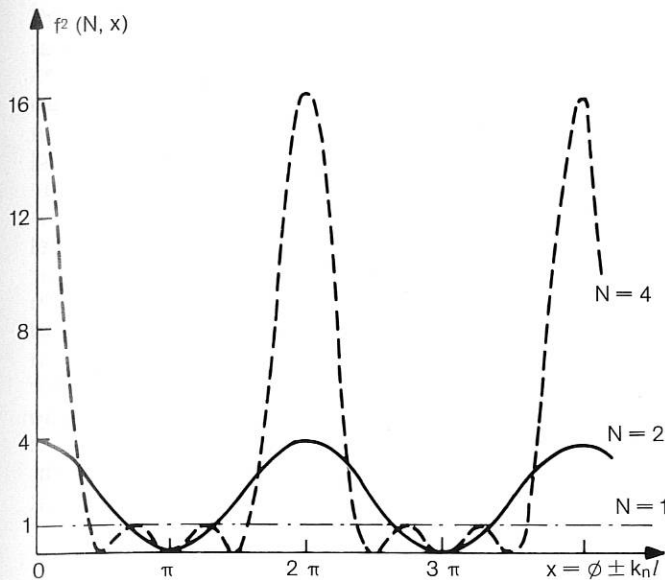


Abb. 16: Interferenzfaktor der Spaltanregung, f^2 ist bei variabler Phasenverschiebung ϕ proportional zum axialen Leistungsfluß der Mode mit Wellenzahl k_n , $N =$ Anzahl der Spalten.

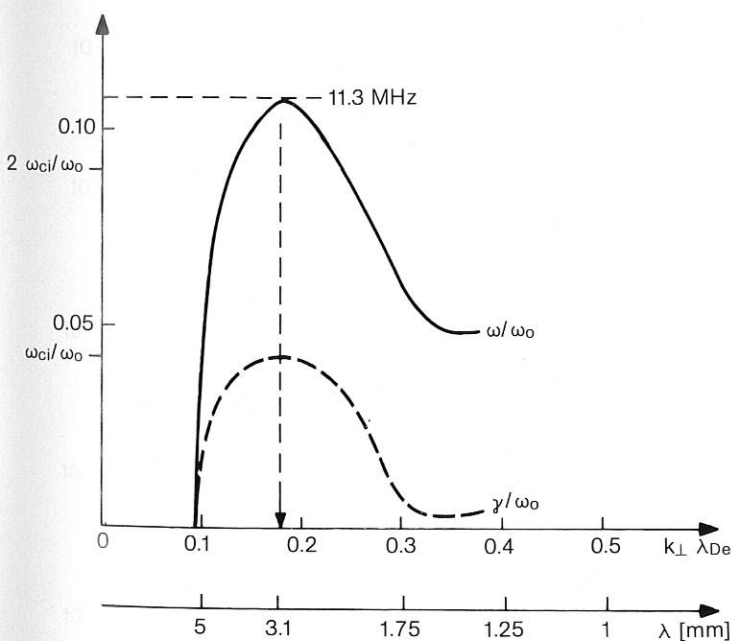


Abb. 17: Frequenz ω und Anwachsrate γ der Resistiven Quasi-Mode als Funktion der Wellenzahl k_{\perp} . Deuteriumplasma: $m_e/m_i = 3670$, $B_0 = 6$ KG, $n_0 = 4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = T_i = 50$ eV, $\lambda_D = 83 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$, $f_{ci} = 4,56$ MHz, $f_{LH} = 89$ MHz, $v/\omega_{LH} = 3,5 \cdot 10^{-4}$, $v_s = 4,8 \cdot 10^6 \text{ cm/sec}$, $k_{\parallel} = 0,12 \text{ cm}$. Pumpfrequenz: $f_0 = 106$ MHz, $k_0 = 0$, $E_0 = 580$ Volt/cm, $E_0/B_0 = 9,6 \cdot 10^6 \text{ cm/sec}$.

Im allgemeinen treten dann innerhalb der Struktur, $1 \leq q < N$, stehende Wellen auf, welche den in Glg. (2) enthaltenen Blindleistungsanteil umwälzen. Das elektrische Feld der stehenden Wellen kann zu parametrischen Instabilitäten führen, wobei die eingespeiste Leistung bereits innerhalb der Struktur verheizt wird. Dies kann man nach Glg. (2) durch Auslegung der Struktur als Richtkoppler¹⁾ für die bevorzugte Mode, $\phi - k_n l = \pi$, vermeiden.

4.1.3 Parametrischer Wellenzerfall

Die neuesten Heizexperimente im Bereich der unteren Hybridenfrequenz, $\omega_{LH} \approx \omega_{pi} [1 + (\omega_{pe}/\omega_{ce})^2]^{1/2}$, haben gezeigt, daß die Heizung der Ionen im Plasma wesentlich mit dem Auftreten parametrischer Instabilitäten verbunden ist / 96 // 89 // 90 /. Um diesen Effekt zu studieren, wurde zunächst die lineare Theorie der parametrischen Instabilitäten durch Zulassung endlicher Ionen-Gyroradien erweitert. Für eine Pumpwelle, $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega_0 t - \vec{k}_0 \cdot \vec{x})$, erhält man in der elektrostatischen Näherung bei Dipolapproximation, $\vec{k}_0 = 0$, eine unendliche Determinante,

$$\| [1 + \chi_e(\omega + m\omega_0, \vec{k}) + \chi_i(\omega + n\omega_0, \vec{k})] \cdot J_{n-m}(\mu) \| = 0, \quad (3)$$

als Dispersionsfunktion, worin die Suszeptibilitäten, $\chi = \chi_{\alpha\beta} k_{\alpha} k_{\beta} / k^2$, des Elektronen- bzw. Ionengases dem Tabellenwerk von Fried und Conte²⁾ zu entnehmen sind. Das Argument der Besselfunktionen $J_n(\mu)$ mißt das Verhältnis der hochfrequenten Driftamplitude des Elektronengases zur Phasengeschwindigkeit der parametrisch angeregten Wellen $\exp(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})$. Im Falle, daß die Pumpfrequenz, ω_0 , im Bereich der unteren Hybridenfrequenz gelegen ist, $1 < \omega_0/\omega_{LH} < 2$, überwiegt der Anteil der oszillierenden $E \times B_0$ -Drift, so daß $\mu = (\vec{E}_0 \times \vec{B}_0 B_0^2) \cdot (\vec{k} / \omega_0)$. In diesem Bereich findet man als Lösung von Gleichung (3) einen Zerfall der Pumpwelle, ω_0 , in eine Hybridenwelle, $\omega_2 = \omega_0 - \omega$, welche die Dispersionsbeziehung, $\text{Real } \epsilon = 0$, $\epsilon = 1 + \chi_e + \chi_i$, befriedigt und in eine instabile Niederfrequenzwelle, $\omega = \omega_R + i\gamma$, die selbst keine Dispersionsbeziehung erfüllt. Eine Reihenentwicklung nach μ zeigt, daß die Anwachsrate,

$$\gamma = -\gamma_2 + \mu^2 \text{Imag}(\chi_e \cdot \chi_i / \epsilon)_{\omega} / (4 \text{Real } \delta \epsilon / \delta \omega)_{\omega_2}, \quad (4)$$

proportional ist zu einem gewogenen Mittel aus Elektronen-Landaudämpfung, $\text{Imag } \chi_e$, und Ionenzyklotrondämpfung, $\text{Imag } \chi_i$. Erstere führt zu Elektronenheizung während letztere für die beobachtete Ionenheizung verantwortlich ist / 91 /. Frequenz und Anwachsrate dieser „resistiven Quasi-Moden“ sind in Abb. 17 als Funktion der transversalen Wellenzahl dargestellt, wobei zur Berechnung nach Glg. (3) Parameterwerte gewählt wurden, welche für das nachfolgend beschriebene Lineare Wellen-Relaxations-Experiment (LIWEX) typisch sind. Man beachte, daß die Bereiche mit positiver bzw. negativer Gruppengeschwindigkeit, $d\omega/dk$, im Seitenband, $\omega_2 = \omega_0 - \omega$, der (kalten) Hybridenwelle und einer (heißen) Ionen-Zyklotronwelle entsprechen. Der aus Glg. (4) für $\gamma = 0$ folgende Schwellwert für μ ist durch die Dämpfungsrate, $\gamma_2 = \text{Im } \omega_2$, der Hybridenwelle gegeben und entspricht im LIWEX einer kritischen Pumpfeldstärke von nur $E_0 = 13$ Volt/cm. Diese Resultate verschieben sich nur wenig, wenn

man die endliche Pumpwellenlänge berücksichtigt, indem man $\epsilon(k, \omega + n\omega_0)$ in Glg. (3) näherungsweise durch $\epsilon(k + nk_0, \omega + n\omega_0)$ ersetzt. Auch wenn man der transversalen Diffusion durch eine effektive Stoßfrequenz, $\nu = k^2_{\perp} D_{\perp}$, Rechnung trägt und die Effekte im inhomogenen Plasma abschätzt, ergeben sich für die resistiven Quasi-Moden die niedrigsten Schwellwerte. Mit der zur „Zündung“ einer Tokamak-Entladung erforderlichen Hochfrequenzleistung findet man schließlich Anwachsraten von der Größenordnung der Ionengyrofrequenz ω_{ci} . Damit soll es möglich sein, das Ionengas in Tokamak-Konfigurationen vorzugsweise im mittleren Plasmabereich, $0,3 < r/a < 0,7$, zu heizen / 92 /.

4.2 Lineares Wellen-Relaxations-Experiment (LIWEREX)

Das LIWEREX dient zum Studium der Hochfrequenzheizung einer 3 m langen Plasmasäule, die den Innenleiter ($\phi = 8$ cm) einer koaxialen Leitung ($\phi_a = 18$ cm) bildet und in einer magnetischen Flasche ($B_{\min} = 6$ kG, Spiegelverhältnis $R = 1,8$) eingeschlossen ist. Die Hochfrequenzkopplung (106 MHz, 30 kW) erfolgt über einen koaxialen Ring, der zwischen zwei Lochblenden ($\phi_i = 8$ cm, Abstand $2d = 5$ cm) angeordnet ist. Die Hochfrequenzentladung wird durch eine kurze (0.1 msec) PIG-Entladung gezündet und dann im Impulsbetrieb (2–3 msec, Impulsabstand ~ 15 msec) untersucht. Mit einem Druck von $p = 1,2 \cdot 10^{-4}$ Torr Deuterium erhält man ein Plasma der mittleren Dichte $\langle n \rangle \approx 6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ bei mittleren Temperaturen von $\langle T_e + T_i \rangle \approx 100$ eV.

Nachdem die Messung der radialen Profile von Dichte und Temperatur im Jahresbericht 1975 beschrieben wurde, beschränken wir uns hier auf eine Diskussion der parametrischen Relaxationserscheinungen. Abb. 18 zeigt das Frequenzspektrum, das mit einer Sonde im Abstand 3,5 cm vom Kopplungsring abgegriffen wurde. Das breite Niederfrequenzband zeigt, daß es sich hier um einen nicht-resonanten Vorgang handeln muß. Die kleinen Maxima bei f_{ci} und $2 \cdot f_{ci}$ deuten auf die Anregung von Ionen-Zyklotronwellen hin. Sie treten spiegelsymmetrisch verschoben im unteren Seitenband der Pumpfrequenz, f_0 , wieder auf, während das obere Seitenband kaum angeregt ist. Diese Erscheinungen weisen eindeutig auf den vorstehend beschriebenen parametrischen Zerfall der Pumpwelle in eine Hybridenwelle und resistive Quasimoden hin. Numerisch stimmt die gemessene Bandbreite des Niederfrequenzbereiches $\Delta f \approx 15$ MHz annähernd mit der für LIWEREX berechneten überein (vergl. Abb. 17 und Abb. 18). Um die Übereinstimmung von Theorie und Experiment weiter zu prüfen, wurde versucht, die radialen bzw. azimuthalen Wellenzahlen k_{\perp} mit HCN-Laser Streuung zu messen. Obwohl die Empfindlichkeit unserer Anordnung bei Erfüllung der Bragg-Bedingung ausreichen sollte, ist dies nicht gelungen. Wir nehmen an, daß sich durch die extrem hohen Anwachsraten ($\gamma \approx \omega_{ci} = 4.56$ MHz in Abb. 17) in kürzester Zeit ($1/\gamma = 220$ nsec!) ein turbulenter Zustand einstellte, so daß die Bragg'sche Interferenzbedingung nicht mehr zu erfüllen war. Wir hoffen, künftig das Spektrum der azimuthalen Wellenzahl durch inkohärente CO_2 -Laser Streuung zu messen.

Inzwischen haben wir die räumliche Verteilung der parametrischen Instabilität in radialer und achsialer Richtung vermessen. Abb. 19 zeigt das mit einer Doppelsonde nahe des Kopplungsringes $z = 3,5$ cm empfangene Signal und zwar bei der Pumpfrequenz f_0 , dem Seitenband $f_0 - f_{ci}$ und der Ionen-Gyrofrequenz f_{ci} , welche den Maxima in Abb. 18 entsprechen. Der radiale Verlauf des Feldes entspricht qualitativ dem Querschnitt eines Resonanzkegels, dessen Anstellwinkel zu $1,5^\circ$ berechnet wurde. Mit einem Polarinterferometer mißt man bei achsialer Verschiebung der Doppelsonde eine Pumpwellenzahl von $\text{Re } k_{0\parallel} = 0,03 \text{ cm}^{-1}$ und eine Dämpfungsrate von $\text{Im } k_{0\parallel} = 0,025 \text{ cm}^{-1}$. Dagegen ist die, nach Glg. (2) durch unsere Koppelstruktur ($N = 2, \phi = \pi, l = d = 2,5$ cm) am stärksten angeregte Wellenzahl viel größer: $k_{0\parallel} = 0,93 \text{ cm}^{-1}$. Das zugehörige Landau-Dämpfungsdekrement $\text{Im } k_{0\parallel} = 1,35 \text{ cm}^{-1}$ zeigt an, daß alle höheren Moden überkritisch gedämpft sind und dadurch zur Elektronenheizung beitragen.

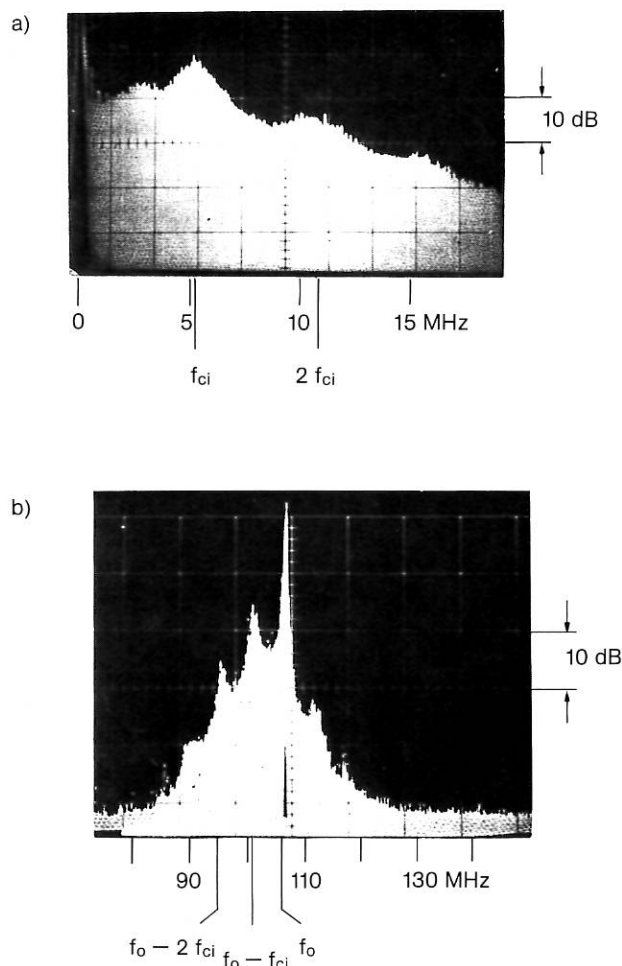


Abb. 18: Frequenzspektrum der Parametrischen Zerfallswellen bei $r = 3$ cm im Abstand $z = 3,5$ cm vom Kopplungsring.

- a) Niederfrequenzband
- b) Pumpfrequenz und Seitenbänder

Demnach wird das Fernfeld von den weniger stark angeregten Grundmoden bestimmt, so daß der Resonanzkegel stark verwaschen wird. Tatsächlich verschiebt sich die radiale Position der Maxima in Abb. 19 nicht meßbar, wenn man den Abstand von der Einkopplung ändert. Die Koinzidenz der Maxima bei den verschiedenen Frequenzen erklärt sich daraus, daß sich die parametrische Zerfallswellen nach Glg. (3) vorwiegend in der azimuthalen $E_0 \times B_0$ -Richtung ausbreiten. Demnach ist auch die beobachtete Dämpfungsrate der Pumpwelle, im $k_{01} = 0.025$, vorwiegend der Auszehrung durch den parametrischen Zerfall zuzuschreiben.

Um die Wirkung der parametrischen Prozesse und Dämpfungsmechanismen auf die Ionen zu bestimmen, wurden gleichzeitig die durch Ladungsaustausch resultierenden Spektren der schnellen Neutralteilchen in transversaler Richtung gemessen. Das in Abb. 20 dargestellte Resultat zeigt die Anwesenheit zweier

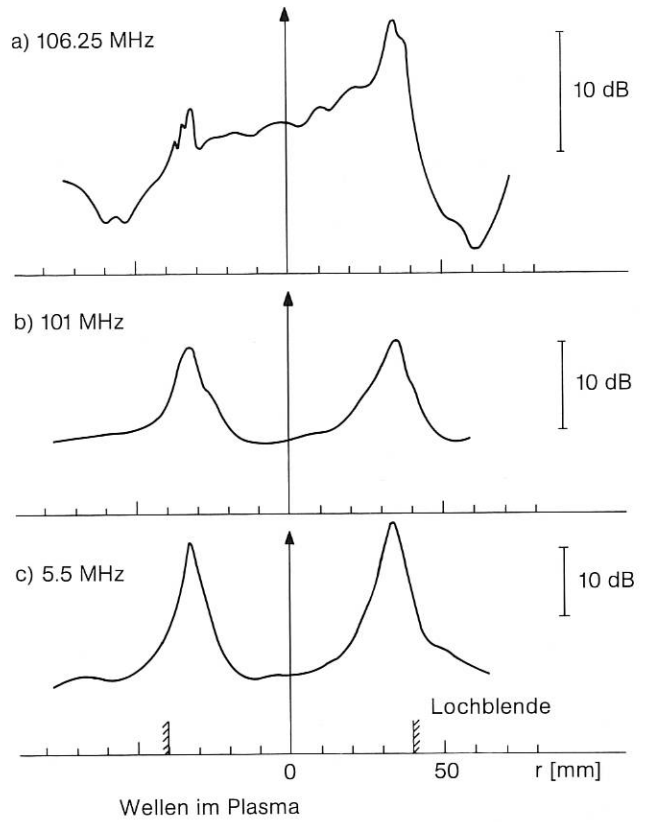


Abb. 19: Radiale Verteilung des Hochfrequenzfeldes im Abstand $z = 3,5$ cm vom Kopplungsring
 a) Pumpfrequenz $f_0 = 106,25$ MHz
 b) Unteres Seitenband bei 101 MHz $\approx f_0 - f_{ci}$
 c) Niederfrequenz bei 5,5 MHz $\approx f_{ci}$

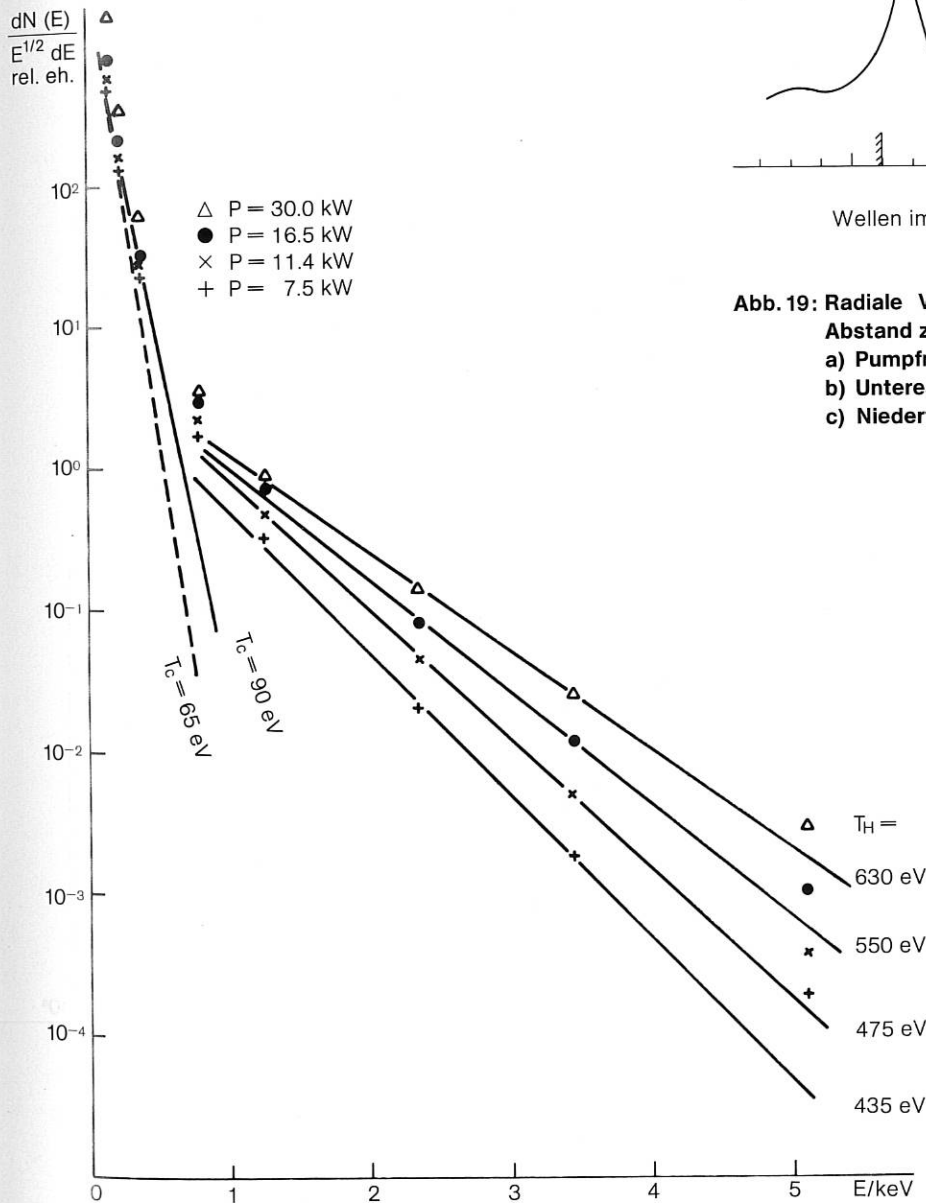


Abb. 20: Transversale Energieverteilung der Deuteriumatome bei verschiedenen Hochfrequenzleistungen.

Maxwell'scher Energieverteilungen. Die Temperatur der „kalten“ Ionen, $T_c \leq 90$ eV, stimmt annähernd mit der aus dem diamagnetischen Signal ermittelten überein. Sie steigt nur wenig mit der eingespeisten Hochfrequenzleistung, während die Temperatur der „heißen“ Ionen kräftig zunimmt. Man kann dieses Resultat grob mit der Theorie vergleichen, indem man der Abb. 17 die instabilste Wellenzahl entnimmt, $k_{\perp} \lambda_D = 0.2$, und damit die Phasengeschwindigkeiten, ω/k_{\perp} , der Quasimode und der Hybridenwelle bestimmt. Die entsprechenden Ionenenergien von 8 eV bzw. 2320 eV liegen eindeutig innerhalb der respektiven Bereiche der beiden Maxwellverteilungen. Allerdings ist damit die Relaxation der Hochfrequenzenergie gegen die beiden Maxwellverteilungen noch nicht erklärt. Hierzu ist ein weiteres Studium der bereits erwähnten, durch Hochfrequenz induzierten Turbulenz erforderlich.

4.3 CO₂-Laser Streuung

Zur Diagnostik der Hochfrequenzheizung und „anormaler“ Transportprozesse, die bekanntlich mit überthermischen Schwankungen der Plasmaparameter (Turbulenzen) zusammenhängen³⁾, wird eine Methode zur Kleinwinkelstreuung ($\Theta \leq 1^\circ$) von gepulstem ($\tau = 2 \mu\text{sec}$) CO₂-Laserlicht ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) an Wellen entwickelt. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode besteht darin, daß die Mittelwerte der Plasmaparameter zur Bestimmung eines Frequenzspektrums ($f > 10/\tau = 5$ MHz) nur während kurzer Zeit ($\tau = 2 \mu\text{sec}$) konstant sein müssen. Um den empfindlichen Homodynempfang der schwachen Streustrahlung zu ermöglichen, war es erforderlich, einen streng monochromatischen Hochleistungslaser (400 kW) mit einer möglichst glatten Gauß-förmigen Impulseinhüllenden zu entwickeln. Durch Verbesserungen nach dem im Jahresbericht 1975 vorgestellten Schema ist es inzwischen gelungen, einen Hybridenlaser mit den gewünschten Spezifikationen zu bauen. Der aus Spiegel und Reflexionsgitter bestehende optische Resonator dieses Lasers enthält eine transversal, durch Impulse angelegte (TEA)-Hochdruckzelle und eine mit Gleichstrom betriebene Niederdruckzelle. Die schwache Dopplerverbreiterung der CO₂-P(20)-Rotationslinie in der Niederdruckzelle erzwingt das Schwingen des Lasers in einer einzigen longitudinalen Mode, obwohl die starke Druckverbreiterung derselben Rotationslinie in der leistungsstarken Hochdruckzelle eine Vielzahl solcher Moden zulassen würde.

Dieses System wurde zunächst durch Streuung an Schallwellen (6.24 MHz) in Kochsalzkristallen bei Erfüllung der Bragg'schen Interferenzbedingung / 93 / geprüft. Abb. 21a zeigt das bei Mischung von Laserlicht mit dem Dopplerverschobenen Streulicht erhaltene Zwischenfrequenzsignal und darunter das ungefilterte Ausgangssignal des Hg-Cd-Te Detectors. Ersteres schwingt mit der Frequenz der Schallwelle, während letzteres die Form der Impulseinhüllenden wiedergibt. Das bei Abwesenheit der Schallwelle erhaltene, in Abb. 21b dargestellte Resultat zeigt, daß das Frequenzspektrum der Impulseinhüllenden selbst noch nicht stört. Als rauschäquivalente Leistung des Homodynempfängers wurden $1,6 \cdot 10^{-16}$ W/Hz gemessen.

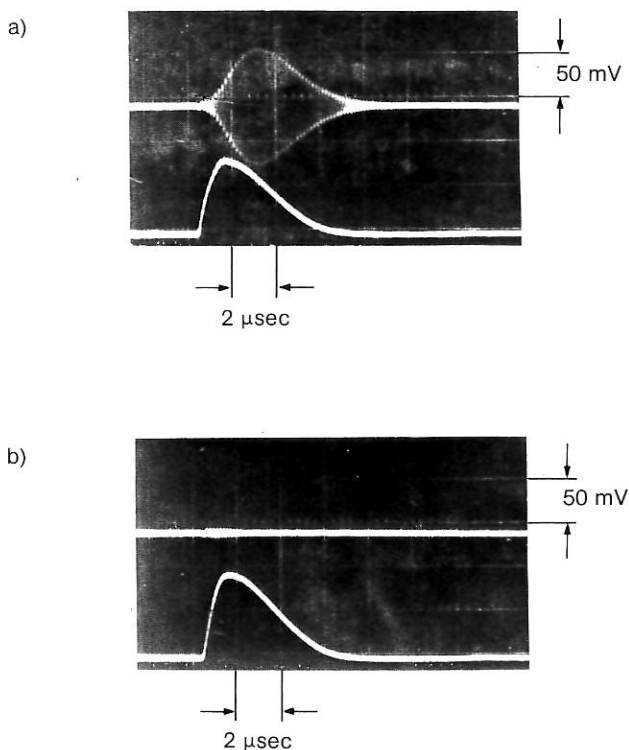


Abb. 21: Mischprodukte von Laser- und Streusignal an Schallwellen im Kochsalzkristall
a) gefiltertes (6.24 ± 0.15 MHz) und darunter ungefiltertes Detektorsignal bei Anwesenheit der Schallwelle
b) dieselben Signale bei Abwesenheit der Schallwelle

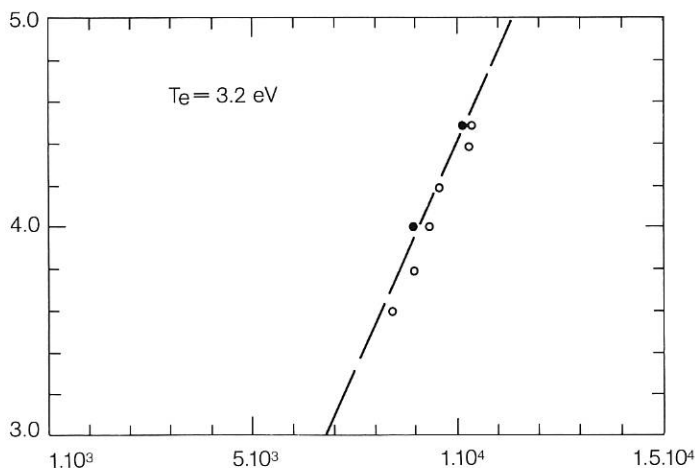


Abb. 22: Dispersionsbeziehung ionoakustischer Wellen
Punkte: Messung durch CO₂-Laser Streuung
Kreise: Messung durch Doppelsonden-H.-F.-Interferometer
Linie: Resultat der Theorie

Bei Ersatz der Schallwellen im Salzkristall durch Ionenakustische Wellen ($\tilde{n}/n_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$, $f = 4$ MHz) in einem Argonplasma ($n_0 = 3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = 3,2$ eV, $B_0 = 30$ Gauß) lieferte dasselbe Streuexperiment zunächst ein negatives Resultat. Deshalb wurde die Streuung an Ionenakustischen Wellen im Dauerstrichbetrieb überprüft, wobei die Niederdruckzelle des Hybridenlasers (1–2 Watt) und zusätzlich ein LOCK-IN-Verstärker am Detektorausgang verwendet wurde. Auf diese Weise konnte die Ionenakustische Dispersionsbeziehung einwandfrei gemessen werden. Das in Abb. 22 dargestellte Resultat zeigt die vollkommene Übereinstimmung dieser Streumessungen mit der Theorie, sowie mit der interferometrischen Messung der Dispersionsbeziehung durch bewegte Langmuir-Sonden/13/. Aufgrund dieser Messungen war es ferner möglich, vorauszusagen, daß das Streusignal im Impulsbetrieb bei 25 Dezibel über dem Rauschpegel zu erwarten war. Schließlich konnte die Abwesenheit des Streusignals im Impulsbetrieb auf eine subtile Interferenz der Marx-Generatoren des Lasers mit dem Plasma zurückgeführt werden. Durch eine sorgfältige Abschirmung der Generatoren und des Plasmas hoffen wir schließlich das von den Ionen-

akustischen Wellen herrührende Streusignal auch im Impulsbetrieb zu sehen. Die inkohärente Streuung an überthermischen Schwankungserscheinungen im Plasma erfordert dann noch eine Steigerung der Leistung (1–2 MW), die mit einer Aufweitung des Strahlenbündels in unserem Lasersystem ohne weiteres zu erreichen ist.

5. JET – Joint European Torus

(M. Bauer¹⁾, D. Eckhart²⁾, B. J. Green³⁾, C. Ludescher⁴⁾, G. Mannhardt⁵⁾, R. Pöhlchen⁶⁾, B. Streibl⁷⁾, G. Venus²⁾, D. Zimmermann⁸⁾)

Der „Joint European Torus“ ist ein in Planung befindliches Tokamak-Großexperiment mit dem Ziel, Plasmen zu erzeugen und zu studieren, deren Parameter möglichst nahe an diejenigen herankommen, wie sie in einem zukünftigen Fusionsreaktor vorliegen müssen. Seine Planung wird von einer Gruppe von Physikern und Ingenieuren durchgeführt, die aus den neun mit



¹⁾ Verwaltung, ²⁾ Vakuum und Pumpsysteme, ³⁾ Physik, ⁴⁾ Toroidalfeld-Spulen, bis Juli 1976, ⁵⁾ Planung, bis Mai 1976, ⁶⁾ Toroidalfeld-Spulen, ⁷⁾ Vakuumgefäß und Pumpsysteme, ab Juli 1976, ⁸⁾ Steuerung und Datenerfassung

EURATOM assoziierten Labors in das englische Fusionszentrum Culham delegiert sind. Diese Gruppe hat im Bericht EUR-JET R-5 einen Projektvorschlag mit den Abschätzungen über Kosten und Personalbedarf für das Experiment vorgelegt. Die ursprünglich vorgesehene zweijährige Planungsphase war Ende des Jahres 1975 abgelaufen, ohne daß eine Entscheidung über die Zukunft des Projekts gefallen war. Um die Planungsgruppe in Culham zusammenzuhalten und ihr die Weiterarbeit zu ermöglichen, wurde das „Design Agreement“ im Laufe des Berichtsjahres 1976 zweimal um jeweils sechs Monate verlängert. (Eine weitere Verlängerung ist für das erste Halbjahr 1977 vorgesehen.) Die Unklarheit über die Zukunft des Projekts und die dadurch bedingte kontinuierliche Abnahme der Personalstärke der Planungsgruppe hat deren Arbeit erschwert. So sollte einerseits die Detailplanung weitergeführt (ein Bericht über die Entwicklung des Projekts wird in Kürze als EUR-JET R-8 veröffentlicht) und insbesondere die Projektierung langfristiger Maschinenkomponenten so weit wie möglich vorangetrieben werden, andererseits war die Gruppe mehrmals aufgefordert worden, den Abschluß ihrer Projektstudien vorzubereiten.

Das Ausbleiben klarer Entscheidungen ist durch Vorgänge im wesentlichen politischer Natur verursacht; denn die technische Kompetenz der Planungsgruppe und die Realisierbarkeit des von ihr vorgelegten Entwurfs wurde weiterhin bestätigt: im April 1976 wurde die Prüfung des Projektentwurfs durch ein Team britischer Ingenieure aus dem UKAEA-Reaktorbauzentrum Risley abgeschlossen. Die Stellungnahme der JET-Planungsgruppe zu den vom Risley-Team beanstandeten Detailfragen liegt als Bericht EUR-JET R-9 vor.

Auch auf vielen der internationalen Konferenzen wurde das Konzept von JET diskutiert und seine Gültigkeit im Rahmen der Entwicklungen auf dem Tokamak-Gebiet bestätigt. An dieser Stelle seien erwähnt: der „Workshop on High Density Tokamak Results“ sowie die „2nd IAEA Conference on Large Tokamaks“ / 99 // 103 // 104 // 105a // 106 /. Unmittelbares Resultat dieser Diskussionen war der Beschluß des JET-Management-Committees, die Leistung der für die erste Ausbaustufe vorgesehenen zusätzlichen Plasma-Heizung auf 10 MW zu erhöhen.

Was die technische Planungsarbeit der Gruppe angeht, so konnte – trotz der oben erwähnten Schwierigkeiten – die Projektierung einer Reihe von Komponenten hinreichend genau detailliert werden, um die Fertigung von Prototypen an die Industrie nach einer internationalen Ausschreibung zu vergeben. Zu diesen Komponenten gehören:

- die Kupferleiter für die Toroidal-feld-Spulen sowie für die äußeren Spulen des Poloidal-feldes,
- die Hauptfeldspulen selbst,
- die dünnwandigen Kompensatoren für das Vakuumgefäß,
- die starren Sektoren für das Vakuumgefäß.

Ebenso wurden die Ausschreibungen für einen Schwungradgenerator versandt. Eine große Anzahl von Einzelproblemen wurde in Form genau spezifizierter Studienverträge bearbeitet, die teilweise an die assoziierten Institute und teilweise an die Industrie vergeben wurden.

Die umfangreichsten Studienverträge betreffen:

- die Entwicklung von Neutralteilchen-Injektoren,
- Tests an Hochleistungs-Schaltern,
- Auslegung des Kühlsystems,
- Vorschläge zur Herstellung der mechanischen Stützstruktur,
- Studien über die JET-Gebäude.

Das IPP hatte insbesondere die Bearbeitung von Problemen wie Zerstäubungsmessungen, Berechnung kritischer Knicklasten des Vakuumgefäßes, Schalter-Tests, und das Verhalten großer Kryopumpen (am Fritz-Haber-Institut in Berlin) übernommen.

Neben dieser vertraglich vereinbarten Zusammenarbeit, die für die JET-Planungsgruppe besonders wichtig ist, existieren Kontakte mit den Planungsgruppen anderer Tokamak-Großexperimente wie TFTR (USA), JT-60 (Japan), T-10M und T-20 (UdSSR). Im Rahmen der IAE wurden informelle Treffen über Vakuumgefäße und Pumpsysteme (Culham, Juli 1976) sowie Neutralteilchen-Injektoren (Princeton, Dezember 1976) abgehalten und eine engere Zusammenarbeit eingeleitet.

Bereich Theorie

(Prof. Dr. Dieter Pfirsch)

Zur Bestimmung der Eigenschaften von Hoch- und Nieder-Beta-Stellarator-Gleichgewichten wurden die dreidimensionalen Gleichgewichts- und Stabilitätsuntersuchungen im Rahmen der Magnetohydrodynamik analytisch und numerisch fortgeführt. Zur Erzielung eines für einen ökonomischen Reaktor hinreichend großen β 's sind bei Tokamaks Anordnungen mit nichtkreisförmigem Querschnitt von besonders großem Interesse. Solche Anordnungen besitzen im Hinblick auf axial-symmetrische Störungen jedoch ein kritisches Stabilitätsverhalten, bei dessen Untersuchung neue Ergebnisse erzielt wurden.

Die in den Tokamak-Entladungen beobachteten gefährlichen disruptiven Instabilitäten hängen sehr wahrscheinlich mit Einflüssen des endlichen Plasmawiderstands zusammen. Mittels numerischer (zweidimensional, dreidimensional in Vorbereitung) und analytischer Verfahren wurden deshalb nichtideale magnetohydrodynamische lineare und nichtlineare Stabilitätsrechnungen durchgeführt. Dazu gehören auch allgemeine Aussagen über die Auswirkung von Viskosität, endlichen Gyroradien und endlicher elektrischer Leitfähigkeit auf das Stabilitätsverhalten mit Ergebnissen, die insbesondere für hohes β von Bedeutung sind.

Eine Weiterentwicklung des Transport-Codes erlaubt eine Beschreibung und Erklärung des Hochdichtebereichs in PULSATOR und ALCATOR (MIT), aufgrund deren der Nutzen einer Gaszufuhr für große Tokamaks wie JET bezweifelt werden muß. Eine andere Erweiterung des Codes gestattet, das Wechselspiel verschiedener Verunreinigungssorten zu behandeln. Von grundlegender Bedeutung für die Möglichkeit, einmal einen ökonomischen Reaktor bauen zu können, sind Ergebnisse einer Untersuchung über den Zusammenhang zwischen anomaler Diffusion und dem in einem magnetisch eingeschlossenen Plasma höchstens erreichbaren β . Für den ganzen Fragenkreis der Transportvorgänge ist von großer Wichtigkeit, Aussagen über das Transportverhalten eines Plasmas im trapped-ion-Gebiet zu erhalten. Dazu wurden quasimakroskopische Gleichungen numerisch gelöst. Die derzeitigen Ergebnisse deuten Bohm-artiges Verhalten an.

Ein offenes Problem bei der Kernfusion stellt weiterhin die Aufheizung eines Fusionsplasmas dar. Neue Untersuchungen, die Magnetfeldinhomogenitäten und Stöße berücksichtigen, lassen eine Ionengyroresonanzheizung bei der doppelten Gyrofrequenz für größere Experimente wie z. B. W VIIa sinnvoll erscheinen.

Für Hoch- β -Experimente brachte eine Theorie der Transportkoeffizienten, basierend auf Ionenschallturbulenz und verwandten Spektren, eine sehr gute Beschreibung der experimentellen Resultate.

Die Entwicklung numerischer Verfahren bedeutet die Bereitstellung wesentlicher Hilfsmittel für die Durchführung der umfangreichen numerischen Rechnungen. Hier ist vor allem die Erstellung von Programmgeneratoren für mehrdimensionale Rechnungen zu nennen.

1. Magnetohydrodynamische Untersuchungen

(D. Biskamp, R. Chodura*), W. Gentsch**), D. Lortz, P. Merkel**), J. Nührenberg, E. Rebhan, A. Salat, A. Schlüter**), U. Schwenn, G. Spies, H. Tasso, H. Welter)

Die hier zusammengefaßten Arbeiten behandeln das makroskopische Verhalten von Plasmen, das im wesentlichen durch die magnetohydrodynamischen (MHD) Gleichungen, gegebenenfalls unter Einschluß nicht-idealer Effekte, bestimmt wird.

1.1 Gleichgewicht und Stabilität

Dreidimensionale magnetohydrostatische Gleichgewichte wurden mit mehreren Methoden untersucht: Entwicklung solcher Gleichgewichte um ihre magnetische Achse, Entwicklung nach kleinen Parametern, die die Abweichung von einem eindimensionalen Gleichgewicht beschreiben, und dreidimensionale numerische Rechnungen.

Die Formulierung der MHD-Theorie dreidimensionaler MHD-Gleichgewichte in der Nähe der magnetischen Achse einschließlich Diskussion der Stagnationspunkte in den magnetischen Flächen dritter Ordnung und der daraus ableitbaren β -Abschätzung, die unter der Nebenbedingung hinreichender oder notwendiger Stabilitätskriterien erfolgt, wurde abgeschlossen. Für Konfigurationen ohne Strom auf der magnetischen Achse wurde ein neues Stabilitätskriterium erhalten, das Stabilität ohne leitende Wand am Plasmarand sichert. Die Theorie wurde auf Gleichgewichte mit ebener magnetischer Achse und verschwindender Rotationstransformation angewandt. Ein Ergebnis ist, daß für diese Gleichgewichte notwendiges und hinreichendes Kriterium zusammenfallen. Für den zunächst untersuchten Fall konstanten Magnetfeldes auf der magnetischen Achse sind Plasma- β -Werte von 10% erreichbar (die Vergleichszahl für den $\ell = 2$ Stellarator ohne Strom ist 0.2%). Die Optimierung von β im Funktionenraum $B_0(\ell)$ (Magnetfeld), $e(\ell)$ (Achsenverhältnis des elliptischen Plasmaquerschnitts), $K(\ell)$ (Krümmung der magnetischen Achse), $S(\ell)$ (Verschiebung der äußeren $Sd\ell/B$ -Flächen) unter den Nebenbedingungen beschränkter Aspektverhältnisse und e_{\max}/e_{\min} steht vor dem Abschluß. Rechnungen für den $\ell = 2$ Stellarator mit Längsstrom sind im Gange (D. Lortz, J. Nührenberg).

Im Rahmen einer Entwicklung dreidimensionaler toroidaler Gleichgewichte um eindimensionale Gleichgewichte wurden folgende Teilergebnisse erzielt:

Die bei einem ungestörten Gleichgewicht mit magnetischer Verschering in erster Ordnung auf korrugationsresonanten magnetischen Flächen auftretenden Singularitäten müssen nicht die Nichtexistenz eines gestörten Gleichgewichts, sondern können auch das Auftreten bananenförmiger Separatrices bedeuten.

*) Bereich Hoch-Beta-Plasmen

**) Bereich Relativistische Plasmen

Die bei einem ungestörten Gleichgewicht ohne Verschering in zweiter Ordnung auftretenden Lösbarkeitsbedingungen scheinen von der Koordinatenwahl abzuhängen. Festhalten der Rotationstransformation bei der Entwicklung scheint wesentlich, da in den untersuchten Beispielen dabei die Lösungsmannigfaltigkeit am größten ist (G. Spies).

Die dreidimensionalen numerischen Rechnungen gehen von Nichtgleichgewichtszuständen in der gewünschten Geometrie aus und berechnen stabile Gleichgewichte, indem sie dem System Plasma-Magnetfeld mittels einer Reibungskraft, die der lokalen Plasmageschwindigkeit proportional ist, Energie entziehen, bis das Minimum der Energie erreicht ist. Dabei wurden als Zwangsbedingungen der Bewegung des Systems die Erhaltung von Masse, magnetischem Fluß und Entropie eingeführt. Bei der expliziten Integration dieser sog. MHF-Gleichungen wurden zwei Verfahren getestet, um den Zeitschritt zu vergrößern. Das eine besteht in der Wahl ungleicher Zeitschritte innerhalb einer Periode von Zeitschritten, die so gewählt wurden, daß der Vervielfachungsfaktor für jede Eigenmode kleiner als 1 bleibt. Das andere ist eine Methode des steilsten Gradienten bezüglich der Energie. Das Programm garantiert die geforderten Erhaltungssätze und erzielt durch Zeitintegration in 2. Ordnung eine Energieerhaltung (Systemenergie + Reibungsarbeit) von 10^{-10} . Das Verfahren wurde bisher an dreidimensionalen Bewegungen gerader und toroidaler screw-pinch-artiger Gleichgewichte erprobt. Das System der MHF-Gleichungen wurde auch mit Hilfe eines zweidimensionalen impliziten Verfahrens behandelt (R. Chodura/Bereich Hoch- β -Plasmen; W. Gentsch und A. Schlüter/Bereich Relativistische Plasmen; U. Schwenn).

Im Rahmen dieser Untersuchungen war auch die Aufstellung des holonomen Energieprinzips der Magnetohydrodynamik von Bedeutung. Während in der üblichen Darstellung die zulässigen Variationen der Dichte und des Magnetfeldes durch Nebenbedingungen eingeschränkt sind, konnte eine Form des zu variierenden Energieintegrals gefunden werden, bei der die Variationen keinen Nebenbedingungen unterliegen (P. Merkel, A. Schlüter/Bereich Relativistische Plasmen).

Eine Vereinfachung der Stabilitätstheorie ergibt sich durch die Ersetzung der das Gleichgewicht charakterisierenden Profile durch Stufenfunktionen. Dieses Verfahren ist für die Berechnung globaler Eigenmoden geeignet. Als erste Anwendung wurden symmetrische hoch- β $\ell = 0$ Gleichgewichte mit beliebigem Stufendruckprofil behandelt und das Eigenwertproblem für kleine Abweichungen vom geraden Θ -Pinch explizit gelöst. Dabei ergaben sich folgende Aussagen:

Instabile Eigenmoden haben keine Knoten längs der Feldlinien. Für jedes m (Modenzahl bezüglich des ignoralen Winkels) gibt es höchstens n instabile Eigenmoden, wobei n die Zahl der Sprungflächen ist. Bei jedem Grenzübergang der Art $n \rightarrow n - 1$ strebt ein Eigenwert nach Null. Die wichtigsten instabilen Eigenmoden stetiger Profile werden schon für $n = 2$ gut approxi-

miert, nicht jedoch für $n=1$. Derzeit werden Parameterstudien für den ELMO Bumpy Torus (Oak/Ridge) betrieben. Ein weiteres Ziel ist die Anwendung auf HBS-artige Gleichgewichte (G. Spies, D. B. Nelson – (Oak Ridge)).

Die Arbeiten zu axialsymmetrischen Instabilitäten axialsymmetrischer Gleichgewichte im Rahmen des Oberflächenstrommodells wurden fortgesetzt. Neben Ergebnissen für Doublet-artige Gleichgewichte und bezüglich der Optimierung der Form des Plasmaquerschnitts in Abhängigkeit vom Aspektverhältnis wurden auch methodische Fortschritte erzielt. Bei Doublet-artigem Plasmarand wurde eine Slip-Instabilität bei Elongationen gefunden, für die elliptische Querschnitte noch stabil sind. Hierbei entweicht das Plasma vertikal z. B. nach oben aus dem Poloidalfeld, wobei die obere Plasmahälfte sich ausdehnt und die untere zusammenzieht. Die Instabilität kann durch hinreichend kleine Elongation und schwache Doublet-Einschnürung vermieden werden. Die Optimierung des β -Wertes in Abhängigkeit von der Form des Plasmaquerschnitts für festes Aspektverhältnis A ergab für $A \gtrsim 12$ ungefähre Kreisform, für $4 \lesssim A \lesssim 12$ eine Mischung aus Race-track- und D-Form und für $A \lesssim 4$ eine Doublet-Form.

Bei der Behandlung axialsymmetrischer Instabilitäten muß das sogenannte elektrische Randwertproblem für die vektorielle Poissongleichung gelöst werden. Das hierbei auftretende System inhomogener Integralgleichungen unterliegt Nebenbedingungen, deren Formulierung mittels einer direkten Integraldarstellung erstmals gelang. Bei der Entwicklung des Stabilitätsproblems nach dem inversen Aspektverhältnis A^{-1} wurden Terme der Ordnung $1/\ln A$ entdeckt, die bei Plasmen mit Shear oder komplizierter Querschnittsform wichtig sein können, insbesondere beim Test numerischer Stabilitätscodes gegen asymptotische Formeln (E. Rebhan, A. Salat).

Auch bei der Stabilitätsanalyse im Rahmen der nicht-idealen MHD wurden mehrere Fortschritte erzielt. Es gelang ein Energieprinzip für lineare Bewegungsgleichungen vom Typ

$$N \ddot{\xi} + (F+M) \dot{\xi} + Q \xi = 0$$

aufzustellen, wo N und M hermitesche positive, Q hermitesche und F antihermitesche Operatoren sind.

$$\delta W = (\xi, Q \xi) > 0$$

ist eine notwendige und hinreichende Bedingung für Stabilität. In den folgenden Fällen kann die nichtideale MHD-Theorie mit Viskosität, Gyroviskosität und elektrischem Widerstand auf obige Bewegungsgleichung reduziert werden.

- a) Allgemeine Geometrie, jedoch ohne elektrischen Widerstand. In diesem Fall kann $\delta W = \delta W_{\text{MHD (ideal)}}$ gezeigt werden. Daraus folgt, daß Viskosität und Gyroviskosität eine Verminderung der MHD-Anwachsraten bewirken, aber die Stabilitätsgrenzen nicht verschieben.
- b) Zweidimensionale Geometrie für Gleichgewicht und Störungen. In diesem Fall ermöglicht das neue

Energieprinzip die Untersuchung von (Widerstands-) Stabilität von Stagnationspunkten, die z. B. bei Doublet, bei Divertor-Anordnungen und beim Auftreten magnetischer Inseln wichtig sind. Falls die Stromdichte nach außen zunimmt, ist auch die verallgemeinerte rippling-Mode leicht nachzuweisen. Dies ist möglicherweise eine Erklärung für den anomalen Skineffekt im Tokamak am Anfang der Entladung.

- c) Tokamak-Skalierung für die Störungen. In diesem Fall liefert das Energieprinzip die verschiedenen Widerstandsinstabilitäten (tearing, rippling, resistive kink) und zeigt die Möglichkeit einer starken Minderung der Anwachsraten durch viskose und gyroviskose Effekte. Dies führt zu einer besseren Erklärung der internen $m=1, n=1$ Mode (H. Tasso).

Ferner wurde eine hinreichende Bedingung für die Stabilität zeitabhängiger kraftfreier Felder mit $j/B = \text{const}$ unter Berücksichtigung elektrischen Widerstands, des Hall-Terms und der Viskosität mit Hilfe eines Lyapunov-Funktional gefunden. Dieses Ergebnis unterstützt die Taylor'sche Hypothese einer globalen Invarianten, da sie dieselbe Stabilitätsbedingung liefert (H. Tasso).

1.2 Nichtlineare Widerstandsinstabilität

Das lineare und nichtlineare Verhalten von Widerstandsinstabilitäten in Plasmen wurde in ebener und helikaler Geometrie durch numerische Lösung des Anfangswertproblems untersucht. Aus den linearisierten Gleichungen ergibt sich asymptotisch für gegebene Modenzahlen m, n die Mode mit der maximalen Anwachsrate. Dieses Verfahren unterscheidet nicht zwischen resistiver Schicht und Außenraum und gilt folglich für alle $\eta(r, t)$. Die wesentlichen Ergebnisse sind: Für typische tearing Moden in Tokamak-ähnlichen Plasmen wird die tearing Skalierung $\gamma \sim \eta^{3/5}$ erst bei sehr kleinen Werten von η erreicht, $\eta < 10^{-6}$ in üblichen Einheiten, und zwar bei um so kleineren, je größer m und je kleiner r_s ($q(r_s) = m/n$). Für größere η liegt γ unter der „tearing Anwachsrate“ und wird für $\eta \gtrsim 10^{-4}$ sogar absolut sehr klein. Die Ursache für dieses Verhalten ist, daß die der tearing Skalierung zugrunde liegende konstant- ψ Näherung erst für sehr kleine η Werte gültig ist.

Mehrere zweidimensionale Programme wurden entwickelt, um das nichtlineare Verhalten der tearing Moden zu untersuchen. In einer ebenen Stromschicht wachsen die Inseln bis zu sehr großen Amplituden ohne sichtbare Sättigung, und zwar unabhängig vom Widerstandsprofil. Charakteristisch ist das Koazilieren von Inseln, das zu Inseln mit jeweils verdoppelter Wellenlänge führt. Eine zeitliche Änderung des Hintergrundstromprofils hat eine stabilisierende Wirkung, z. B. für räumlich konstantes η .

Die nichtlineare Entwicklung von tearing Moden in Zylindergeometrie für $m \geq 2$ hängt sehr wesentlich vom Verhalten des Widerstands ab. Deshalb wurden Ohm'sche Heizung und Wärmeleitung ($K_{\parallel} = \infty$ durch $T_e(\psi)$) im Modell berücksichtigt. Allgemein findet man, daß $\eta_{\parallel}(\psi)$ in den Inseln das nichtlineare Verhalten bestimmt.

Für $\eta_1 < 0$, d. h. gegen das Inselzentrum ansteigende Temperatur, wird Sättigung erreicht, wobei die Inselgröße um so kleiner ist, je größer $|\eta_1|$. Für $\eta_1 > 0$ scheint es keine stationären Inseln zu geben. Die Inseln wachsen, bis sie sich auf der Achse berühren.

Die bisherigen Rechnungen werden in zweierlei Hinsicht erweitert:

- a) Da experimentell im allgemeinen $\omega_{e*} > \gamma$ gilt, sollen Driftkorrekturen berücksichtigt werden. Diese Erweiterung ist im linearen Programm bereits durchgeführt.
- b) Um die für die Abbruchinstabilität offenbar sehr wesentliche Kopplung zwischen $m=1$ und $m=2$ zu untersuchen, wird eine einfache Version des Programms dreidimensional erweitert (D. Biskamp, H. Welter).

2. Transportphänomene

(R. Croci, D. Düchs, C. T. Dum, P. Gräff, D. Pfirsch, F. Pohl, R. Saison, F. Sardei, H. K. Wimmel)

Dieses Kapitel umfaßt Untersuchungen über das von Transportgleichungen bestimmte Verhalten von Plasmen, sowie die Herleitung von Transportkoeffizienten, Heiz- und Verlustaten aufgrund bestimmter mikroskopischer Prozesse.

2.1 Transport in Tokamaks

Neben der Weiterentwicklung detaillierter Transportcodes wurden auch grundsätzliche Überlegungen zu Diffusionseigenschaften von Tokamaks durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurde die Hypothese $v_D \leq v_M$ (v_D wirkliche Diffusionsgeschwindigkeit, v_M Diffusionsgeschwindigkeit des Magnetfeldes aufgrund des – möglicherweise anomalen – elektrischen Widerstands des Plasmas), deren generelle Gültigkeit für den stationären Fall vermutet wird, für axialsymmetrische Konfigurationen verifiziert. Diese Beziehung ist in doppelter Weise von Bedeutung.

1. Sie führt zu einer Begrenzung des Plasma- β -wertes

$$\beta < \frac{2 v_{cl}}{v_D}$$

(v_{cl} klassische Diffusionsgeschwindigkeit in ebener Geometrie mit möglicherweise anomalem Widerstand). Diese Schranke stimmt insbesondere mit dem Ergebnis der neoklassischen Theorie überein; für pseudoklassische Diffusion folgt $\beta_p \leq 1$. Für noch stärkere Diffusion ergibt sich ein entsprechend kleineres β , dem für Bohmdiffusion oder Diffusion aufgrund von trapped-ion Instabilitäten eine Temperaturschranke entspricht, die unterhalb der für Fusion notwendigen Zündtemperatur liegt.

2. Die β -Begrenzung ist mit einem bootstrap-Strom verknüpft, der mit einer Modifikation des Ohm'schen Gesetzes zusammenhängt. Nur für $v_D \ll v_M$, was wahrscheinlich bei den gegenwärtigen Experimen-

ten erfüllt ist, besitzen die derzeitigen Transportcodes Gültigkeit (K. Borrass/Systemstudien, D. Pfirsch).

Das Programm für radialen Energie- und Teilchen-transport in Tokamaks wurde für Vergleiche von berechneten und gemessenen Daten für alle wichtigeren Tokamakexperimente benutzt. Der Bericht darüber (P. H. Rutherford, D. F. Düchs, MATT-1272, 1976) dokumentiert auch die zugrunde liegenden physikalischen Modelle detailliert. Die Vergleiche verdeutlichen gegenwärtige Güte und Unsicherheiten dieser Art Plasmasimulation. Ausführliche, extrapolierende Rechnungen wurden in Princeton für TFTR-Daten durchgeführt und zur Zeit wird ein detaillierter Vergleich mit neuesten PLT-Daten vorbereitet (D. Düchs, P. H. Rutherford – Princeton).

Weitere detaillierte Rechnungen wurden zur Dichteerhöhung in Tokamaks aufgrund von Gaseinlaß durchgeführt. Die Verbesserung der Einschlußzeit wurde allgemein als Anomalie betrachtet. Es gelang jedoch, sogar Einzelheiten der Messungen an PULSATOR und ALCATOR (MIT) durch eine spezielle Version des Transportcodes aufgrund von klassischen Effekten zu erklären. Wichtig sind dabei

- a) Volumenrekombination bei Dichten über 10^{14} cm^{-3} ;
- b) detaillierte Berechnung der Teilchenrückstreuung an Limiter und Wand (Koeffizienten nach R. Behrisch);
- c) Beschleunigung der Ionen durch einen Potential-sprung an der Wand;
- d) eventuell der Einfluß des Ware-pinch-Effektes, der auf Vorschlag der Oak-Ridge Gruppe gegenwärtig geprüft wird.

Aufgrund dieser Rechnungen wird der Nutzen einer Gaszufuhr für große Tokamaks (z. B. JET) bezweifelt (D. Düchs).

Die Diffusion mehrerer leichter und schwerer Verunreinigungs-Sorten in einem typischen Tokamak-Plasma wurde auf der Basis der klassischen und neoklassischen Theorie mit einem speziellen r-t Code untersucht. Im einzelnen wurden verwendet:

1. Klassisches Modell (nach Longmire and Rosenbluth) für Zylinder-Geometrie und beliebige Ionensorten. Elektronen-Stöße sind berücksichtigt, dagegen Effekte von Temperatur-Gradienten vernachlässigt.
2. Neoklassisches Modell (nach Hinton, Moore) für den Bananen- und Plateau-Bereich und 2 Ionen-Massen. Mehrere Ionisationsstufen für die schwerere Ionensorte sind zugelassen. Elektronen-Stöße sind vernachlässigt, dagegen Temperatur-Gradienten-Effekte berücksichtigt.
3. Neoklassisches Modell (nach Hirshman, Sigmar and Clarke) für den Bananen-Bereich, beliebige Ionen-Massen und Ionisationsstufen. Elektronen-Stöße und Temperatur-Gradienten-Effekte sind berücksichtigt.

Das Programm berechnet die nichtlineare Diffusion von fünf Verunreinigungs-Ionensorten gegeneinander und gegen H(D) unter Berücksichtigung von Ionisati-

ons- und Rekombinations-Effekten im Nicht-Gleichgewicht. Die Temperaturprofile T_i und T_e sowie das Magnetfeld B werden als gegebene Orts- und Zeitfunktionen eingesetzt. Die sechs nichtlinearen, stark gekoppelten Differentialgleichungen werden simultan (ohne Iteration) mit einem orts- und zeitzentrierten Differenzenverfahren 2. Ordnung gelöst. Das Programm ist so geschrieben, daß es als Unterprogramm für einen Tokamak-Transport-Code verwendet werden kann, mit dem dann auch die Temperaturen und das Magnetfeld selbstkonsistent berechnet werden können.

Es wurden mehrere Parameter-Studien durchgeführt, die das Ziel hatten, die Gültigkeit vereinfachter Modelle und Abschätzungen zu testen, das unterschiedliche Verhalten leichter und schwerer Ionen zu prüfen und den Einfluß verschiedener Anfangs- und Randbedingungen zu untersuchen. Der Schwerpunkt der

Untersuchungen wurde auf Kombinationen leichter (O) und schwerer (Fe) Verunreinigungs-Sorten gelegt, wobei jeweils mehrere Ionisationsstufen berücksichtigt wurden.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Schwere Ionen, deren Anfangsdichte mit dem Ra-Radius nicht abnimmt, haben die Tendenz, leichte Ionen (H und O) nach außen zu treiben. Das ist nicht der Fall, wenn die Gradienten der Anfangsdichte genügend negativ sind (Abb. 1). Die Ergebnisse in den Abbildungen 1 und 2 wurden nach dem klassischen Modell gewonnen. Neoklassische Diffusion liefert qualitativ gleiche Ergebnisse bei einer um etwa den Faktor 50 verkleinerten Zeitskala.
- Durch Zufuhr leichter Verunreinigungen erscheint eine partielle Verdrängung schwerer Verunreinigungen möglich (Abb. 2)
- Die Annahme von Corona-Gleichgewicht liefert in den meisten Fällen keine akzeptable Näherung für die Dichteverteilung zwischen den Ionisationsstufen.
- Die Vernachlässigung der Elektronen-Stöße über typische Einschlußzeiten für große Tokamaks ist nicht immer gerechtfertigt, erst recht nicht bei anomaler Elektronen-Stoßfrequenz (F. Sardei, D. Düchs).

Die Arbeiten zum Verhalten von α -Teilchen in reaktorartigen Plasmen wurden in zwei Richtungen vorangetrieben. Zum einen mußte ein stark nichtgleichförmiges, angepaßtes Gitter für die Energiekoordinate eingeführt werden; die Testrechnungen dazu sind abgeschlossen. Zum anderen soll das α -Teilchenprogramm an den allgemeinen Transportcode angeschlossen werden, wobei die konsistente Behandlung aller Ionensorten (D, T, α , Verunreinigungen) Probleme aufwirft (D. Düchs, D. Pfirsch).

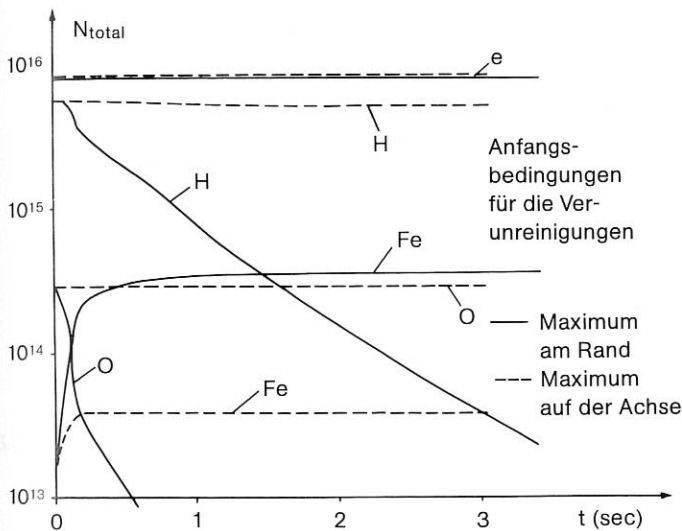


Abb. 1: Einfluß des Anfangsprofils von Fe auf den zeitlichen Verlauf der Gesamt-Teilchenzahl von H bzw. O.

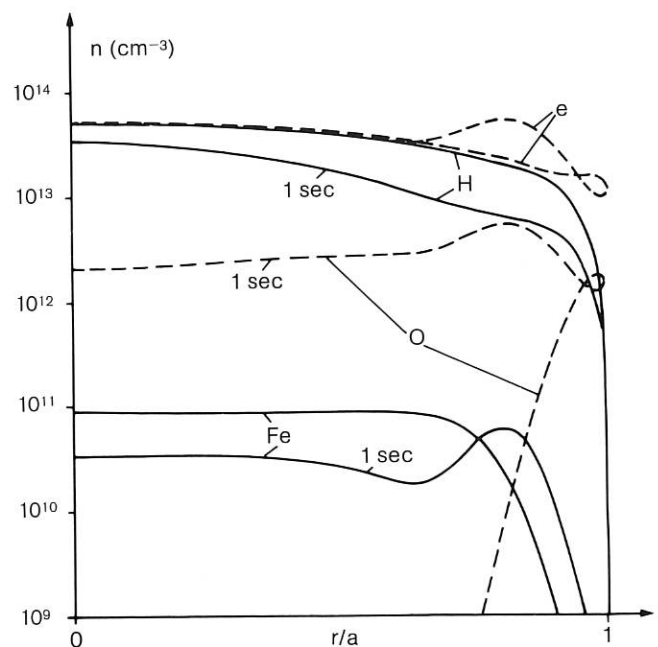
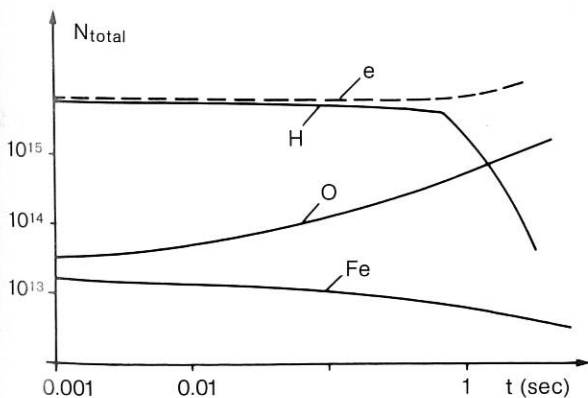


Abb. 2: Verdrängung von Fe durch Zufuhr von O.



2.2 Trapped Particle Instabilitäten

Die im Jahre 1975 begonnene numerische Untersuchung der anomalen Diffusion aufgrund der dissipativen trapped-ion-Instabilität wurde fortgesetzt und durch Tests und Parameterstudien vervollständigt. Dabei wurden die zeitabhängigen, räumlich zweidimensionalen quasi-makroskopischen Gleichungen von Kadomtsev und Pogutse numerisch mit einer expliziten Version der Carlson-Methode gelöst und der (über die ignorable Koordinate gemittelte) anomale Diffusionskoeffizient als asymptotischer zeitlicher Wert für ein ebenes Plasma berechnet.

Aus den numerischen Rechnungen erhält man die folgenden Ergebnisse:

Die Diffusion ist im allgemeinen wesentlich größer als nach Kadomtsev und Pogutse; sie gehorcht näherungsweise einer Bohm-artigen Skalierung (siehe Abb. 3). Der fluktuierende asymptotische Zustand des Plasmas läßt sich näherungsweise durch Überlagerung nur nur zweier azimuthaler Wellenzahlen, $m = 0$ und $m = m_{\text{final}}$, beschreiben, wobei m_{final} von einem Skalierungsparameter m_{marg} als linear ansteigende Treppenfunktion abhängt (Abb. 4). Dieser Parameter ist die marginal stabile Wellenzahl und folgt aus den Gleichgewichtsparametern mit Hilfe der Marginalität der linearen Stabilitätsbeziehung. In der Nähe einer Stufe der Treppenfunktion kann der asymptotische Zustand des Plasmas

nicht durch nur zwei Wellenzahlen und zeitlich konstanten Diffusions-Koeffizienten beschrieben werden. Der fluktuierende Endzustand des Plasmas und die Diffusion sind relativ unabhängig von den numerischen Hilfsparametern Gitterweite und Zeitschritt sowie vom Anfangszustand, sofern Anfangszustände mit ausgezeichneten Symmetrien außer Betracht bleiben (R. Saison, H. K. Wimmel).

2.3 Wellenheizung und Strahlung

Die Absorption von Wellen mit Frequenzen nahe der Ionen-Zyklotronfrequenz ist eine der wichtigsten Methoden der RF-Aufheizung eines Plasmas. Die Theorie, die nun für ein nicht stoßfreies Plasma weiterentwickelt wurde, beschreibt das toroidale Plasma als einen Zylinder der Länge L mit periodischen Randbedingungen, berücksichtigt aber die Variation des toroidalen Hauptmagnetfeldes und die Rotationstransformation. Damit die Ionen hinreichend lange mit dem elektrischen Feld in Resonanz bleiben können, muß die freie Weglänge λ größer als $r \sqrt{q/qr}$ (q Ionenlarmorradius, r kleiner Radius, q inverse Rotationstransformation) sein. Im Gegensatz zum stoßfreien Fall wurde angenommen, daß $\lambda \ll qL$. Da ein Ion bei einem Umlauf um den kleinen Umfang des Torus nur zweimal durch eine Resonanz kommt, „vergißt“ ein Teilchen jede Phasenbeziehung, bevor es wieder in eine Resonanzzone hineinkommt.

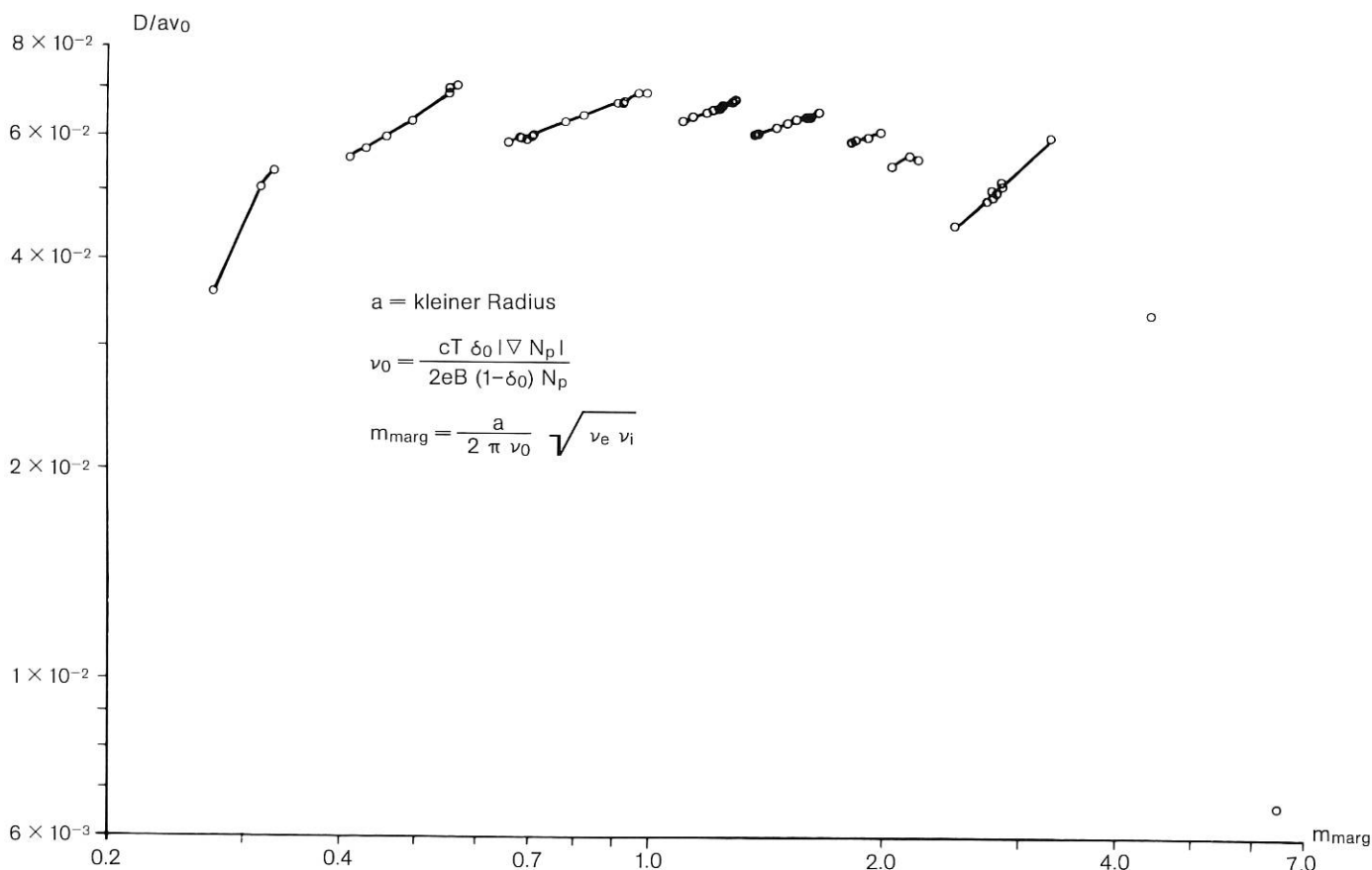


Abb. 3: Dimensionsloser Diffusionskoeffizient $D/av_0 \sim D/D_{\text{Bohm}}$ über der marginal stabilen Wellenzahl.

Unerwartet war das Ergebnis, daß die absorbierte Leistung fast identisch ist mit der im stoßfreien Fall absorbierten Leistung. Aus der numerischen Auswertung der Ergebnisse folgt, daß ICWH für kleinere Maschinen nicht geeignet, für größere (JET) jedoch vielversprechend ist. In W VIIa sollte die Absorption bei $\omega = 2 \Omega_{ci}$ viel günstiger sein als bei $\omega = \Omega_{ci}$. Die Theorie dazu soll einen Vorschlag für die Heizung von W VIIa bei $\omega = 2 \Omega_{ci}$ unterstützen (R. Croci, G. Cattanei/Bereich Niedrig-Beta-Stellaratoren).

Für magnetisch eingeschlossene, heiße Plasmen kann der Energieverlust durch Elektronenzyklotronstrahlung von großer Bedeutung sein. Deshalb wurde die Intensität dieser Strahlung in Zylindergeometrie in Abhängigkeit von Temperatur, Dichte, Magnetfeld, Wand-Reflektivität und Profilparameter (Kasten-, Parabel- oder Glockenprofil) berechnet. Die numerischen Ergebnisse werden mit einer Genauigkeit von etwa 15% durch eine Näherungsformel beschrieben, deren Anwendungsbereich ($1 \text{ keV} < T_e < 100 \text{ keV}$) wesentlich größer ist als bei den bisher üblichen Formeln. (F. Pohl, D. Düchs).

2.4 Plasmaturbulenz und Transporttheorie

Für Ionenschallturbulenz und verwandte Spektren, die in Stoßwellen und bei der Laser-Plasma-Wechselwirkung auftreten, wurde ein vollständiges System von

Elektronentransportgleichungen fertiggestellt. Der Einbau dieser Gleichungen in Chodura's Hybridcode, der die Ionen als Teilchen und die Elektronen als Flüssigkeit behandelt, brachte ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen numerischen Ergebnissen und Theta- sowie Belpinch Experimenten. Neben anomalem Widerstand und anomaler Wärmeleitfähigkeit erwies sich dabei auch die aus der Theorie abgeleitete Erhöhung der effektiven Driftgeschwindigkeit durch Dichte- und Temperaturgradienten für die Anwachsrate der Instabilität als sehr wesentlich.

Die für die Behandlung anisotroper Spektren entwickelten Methoden lassen sich auch auf andere Instabilitäten anwenden (C. T. Dum).

Im Rahmen der Untersuchungen zur allgemeinen Theorie der Turbulenz wurde die stationäre Vlasov-Turbulenz behandelt. Während bislang nur sehr eingeschränkte strenge stationäre¹⁾ und nichtstationäre, jedoch kaum noch turbulente Lösungen bekannt waren, erscheint ausgehend von einem allgemeinen stationären Fall, den Knorr (Knorr, Private Mitteilung) gefunden hat, die Behandlung der homogenen stationären Turbulenz mittels Lösung der Hopf-Gleichung möglich (P. Gräff).

¹⁾ Coole and Taylor, PRL 28, 82 (1972)

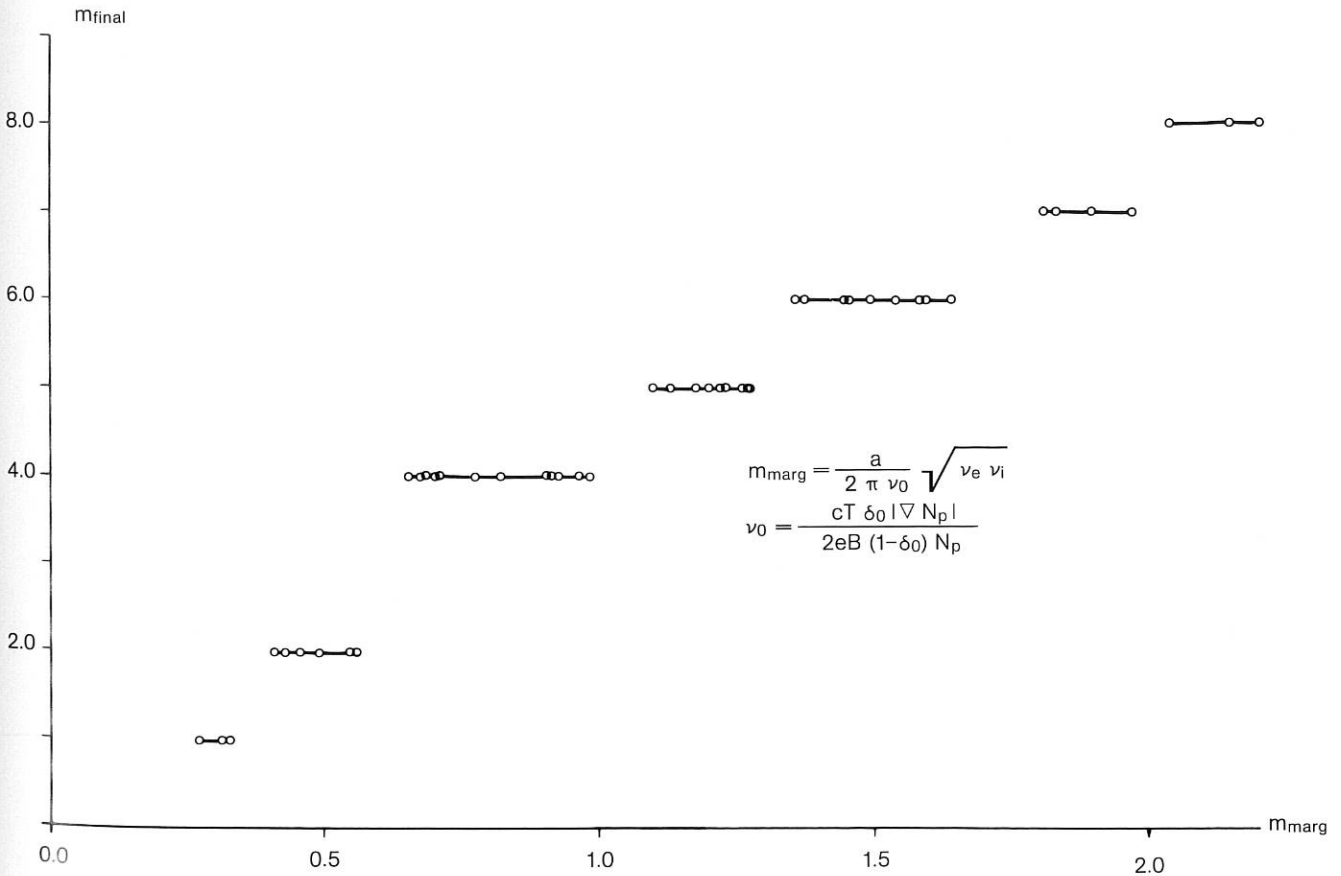


Abb. 4: Azimuthale Wellenzahl im fluktuierenden Endzustand des Plasmas über der marginal stabilen Wellenzahl.

3. Entwicklung numerischer Methoden

(D. Düchs, O. Eder, R. Meyer-Spasche, D. Pfirsch, H. Pillsticker, W. Schneider*), U. Schwenn, J. Steuerwald, H. Tasso)

In diesem Kapitel werden Entwicklungen von Verfahren zusammengefaßt, die unabhängig von ihren Anwendungen auch eigenständige Bedeutung haben.

3.1 Partielle Differentialgleichungen

Im Rahmen der Entwicklung von Programmgeneratoren wurden der Generator zur automatischen, impliziten Diskretisierung zeitabhängiger, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen in zwei Dimensionen auf Zylinderkoordinaten erweitert.

Als Anwendung wurde neben einem Zweiflüssigkeitsmodell vor allem das sog. MHF-Gleichungssystem (siehe Chodura, Schlüter) untersucht, das wegen seiner gemischten zweiten Ableitungen nur explizit oder voll implizit lösbar ist. Die bisherigen Rechnungen dienten vor allem der Bestimmung der numerischen Stabilitätseigenschaften der impliziten Näherungsvorschriften. Der aus der Stabilitätsbedingung expliziter Verfahren folgende maximal zulässige Zeitschritt konnte für quasistationäre Fälle um 10^7 bis 10^9 überschritten werden und war begrenzt durch die Kondition der Matrizen in den algebraischen Gleichungen, die zu zunehmend ungenaueren Lösungen führt. Der Stabilitätsbereich ist aber mehr als ausreichend für alle interessierenden Anwendungen. Der Rechenaufwand wird zu 90% durch die Auflösung der algebraischen Gleichungssysteme bedingt. Deshalb wurden die wesentlichen Algorithmen in die Maschinsprache PL 360 umgeschrieben, was bis zur vierfachen Verminderung der Rechenzeit in der IBM 360/91 führte (U. Schwenn).

Ein anderer Programmgenerator, DEQTRAN, erzeugt FORTRAN-IV-Programme zur numerischen Lösung von Systemen nichtlinearer partieller Differentialgleichungen. Nach der Beseitigung einiger Schwächen, die bei der Anwendung auf sehr große Systeme auftraten, wird jetzt versucht, den Generator noch unabhängiger von speziellen IBM-360-Eigenschaften zu schreiben. Das IPP hat von der Firma Garching Instrumente GmbH ein Angebot für einen Lizenzvertrag über den Programmgenerator erhalten (D. Düchs, W. Schneider).

Im Rahmen der Behandlung des MHD-Stabilitätsproblems mit expliziten Verfahren wurde untersucht, wie man mit möglichst geringem Aufwand die Stabilitätsfrage entscheiden kann. Die Lösung dieses Problems führt auf sogenannte Polynome maximaler Streckung, die sich durch bestimmte Extremaleigenschaften auszeichnen und mit den Tschebyscheffpolynomen eng verknüpft sind (D. Pfirsch, O. Eder).

Die Untersuchung numerischer und mathematischer Fragen bei zwei-dimensionalen MHD-Gleichgewichtsberechnungen wurde weitergeführt. Veröffentlichungen wurden zu folgenden Themen eingereicht: Approximation der Differentialgleichungen durch Differenzen-

gleichungen; Konvergenz des Newtonverfahrens gegen Lösungen, die sich mit anderen Verfahren nicht berechnen lassen. Außerdem wurde gemeinsam mit H. Wobig und I. Horn (Bereich Niedrig-Beta-Stellaratoren) ein Programm für helikale Gleichgewichte entwickelt (R. Meyer-Spasche).

Weiterhin gelang es, die nichtlinearen Wellengleichungen anzugeben, die mit Hilfe des Cole-Hopf Ansatzes auf lineare partielle Differentialgleichungen reduzierbar sind. Ein bekannter Fall ist die Burgers-Gleichung; ein Beispiel für eine neue lösbare Gleichung ist folgende:

$$u_t = (u^3)_x + \frac{3}{2} (u^2)_{xx} + u_{xxx}$$

(H. Tasso).

3.2 Spezielle Programme

In die allgemein zugängliche Programmbibliothek IPPLIB wurden mehrere neu erstellte Programme zur Eigenwertberechnung übernommen. U.a. wurde ein Programm nach dem Verfahren von Crawford geschrieben, das die Lösung des allgemeinen Eigenwertproblems $Ax = \lambda Bx$, wobei A und B symmetrische oder hermitesche Bandmatrizen sind, auf die Lösung des gewöhnlichen Eigenwertproblems zurückführt, ohne die Bandbreite zu vergrößern, so daß der für Bandmatrizen weitaus geringere Speicherplatzbedarf nicht erhöht wird. Die IPPLIB verfügt nun über ein ausreichendes Angebot zur Eigenwertberechnung.

(H. Pillsticker).

Ferner wurde ein Programm für die Reihenlösung von gewöhnlichen Differentialgleichungen unter Verwendung von REDUCE erstellt. Der Speicherplatz erlaubt die Lösung von Systemen gewöhnlicher linearer Differentialgleichungen bis etwa 10^{16} Ordnung (H. Tasso, J. Steuerwald).

4. Bibliothek, Dokumentation

4.1 Bibliothek

(L. Johannsen)

Bestand der Hauptbibliothek und der neun Handbibliotheken (darunter neu die des Bereichs ZTE) am 31. 12. 1976):

- 24 886 Monographien, Konferenzberichte, Loseblattsammlungen
- 29 952 Reports, Dissertationen, Patentschriften
- 1 315 Microfiches
- 95 Mikrofilme
- 11 944 Zeitschriftenbände
- 529 lfd. Zeitschriftenabonnements

Davon Neuzugänge im Berichtsjahre:

- 3 307 Monographien, Zeitschriftenbände etc.
- 2 444 Relev. Reports, Dissertationen, Patentschriften

*) Bereich Hoch- β Plasmen

Informationsdienste:

Es wurden zusammengestellt und verteilt:

- 20 Wöchentliche Vortragskalender
- 223 Einzelankündigungen von Vorträgen
- 4 Titellisten der Berichte, der veröffentlichten und zur Veröffentlichung eingereichten Arbeiten sowie der Vorträge des IPP
- 1 Alphabetisch nach Autoren geordnete Liste der IPP-Berichte und Veröffentlichungen des Jahres 1976
- 12 Kalender in- und ausländischer Tagungen
- 20 Neuerwerbslisten für Bücher und Zeitschriften
- 59 Neuerwerbslisten für Reports

Veröffentlichungen:

Im Berichtsjahre wurde die Veröffentlichung von 114 wissenschaftlichen Manuskripten in Zeitschriften und Konferenzberichten über die Bibliothek abgewickelt.

Versand:

78 neue Sonderdrucke von IPP-Veröffentlichungen und 47 neue IPP-Berichte wurden innerhalb des Instituts verteilt und außerdem an insgesamt 817 ständige Adressen in 40 Ländern nach 25 verschiedenen Verteilerschlüsseln verschickt. Daneben wurden noch 735 gezielte Literaturanfragen bearbeitet.

Übersetzungen:

Die Übersetzung von einer japanischen Arbeit und 28 russischen Arbeiten wurde veranlaßt.

Für die neue Projektgruppe Laserforschung der Max-Planck-Gesellschaft wurden im Berichtsjahre Bücher, Zeitschriften, Reports und Sonderdrucke beschafft bzw. verschickt, sowie Veröffentlichungen bearbeitet.

4.2 Dokumentation

(D. Düchs, M. Müller-Verweyen)

Im Rahmen der Dokumentation des IPP für Plasmaphysik und Kontrollierte Kernfusion wurden 12589 Arbeiten klassifiziert. Sie setzen sich zusammen aus:

- 6622 Arbeiten aus der Plasmaphysik
- 3072 Arbeiten aus der Oberflächen- und Vakuumphysik
- 2723 Arbeiten aus der Technologie
- 172 Arbeiten aus der Mathematik.

Die ZAED gab dieses Material in Form von Monatsheften heraus. Die Kundenliste für die verschiedenen Bereiche erreicht beachtliche Längen:

- 485 für den Plasma Physics Index,
- 260 für den Surface and Vacuum Physics Index,
- 170 für den Technology Index.

Die Arbeiten aus der Mathematik sind (nur für den internen Gebrauch) in einer nur einmal jährlich erscheinenden Liste zusammengestellt.

Daneben wurden noch 71 Recherchen bearbeitet sowie eine sehr aufwendige Zusammenstellung aller Arbeiten über Zerstäubung aus den letzten zehn Jahren gemacht. Diese Literatursammlung gehört zu den Grundlagen für ein geplantes Buch über Zerstäubung.

Das Hauptziel der Arbeiten des Projekts Plasma-Wand-Wechselwirkung (PWW) lag auch 1976 bei der Messung von atomaren Daten, welche für das Verständnis der PWW Voraussetzung sind. Dabei konnten aus der großen Menge der fehlenden Werte nur wenige, aber besonders für ASDEX, JET und für Plasmasimulationsrechnungen wichtige Daten gewonnen werden. Dies sind:

Messungen der Erosionsausbeuten von Edelstahl, Nb, SiC, C, B₄C bei senkrechtem Beschuß mit leichten Ionen (H, D, ³He, ⁴He) mit Energien von 50 eV bis 100 keV;

Aufsammelmessungen an Ti, Zr, Ta;

Messungen zur Rückstreuung bei senkrechtem Ionenbeschuß verschiedener Metalle mit leichten Ionen mit Energien zwischen 1 keV–10 keV und

Untersuchungen zur Desorption durch Ionenbeschuß im Energiebereich um 1 keV.

Ein anderer wichtiger Bereich waren Untersuchungen zur PWW in Tokamaks mit dem Experiment QWAAss. Nach Beendigung der Messungen am PULSATOR wurden mit der Anlage QWAASS Messungen in Fontenay-aux-Roses am TFR 400 durchgeführt. Dabei wurde u. a. beobachtet, daß die auf einer Probenfläche deponierte Metallmenge vom Abstand der Probenfläche zum Plasma abhängt. Damit erwies sich QWAASS auch als nützliche Diagnostik für das Plasma im Limiter-schatten. Auch in den Experimenten, in denen der Limiter aus Graphit war, fand man beachtliche Molybdän-Niederschläge auf der Probenfläche, was beweist, daß die Plasma-Wand-Wechselwirkung nicht nur am Limiter stattfindet.

Die allgemeinen Überlegungen zur Plasma-Wand-Wechselwirkung und den daran beteiligten Prozessen wurden – zum Teil im Zusammenhang mit Übersichts-vorträgen – weitergeführt.

Die Zusammenarbeit mit den Münchner Hochschulen im Rahmen des SFB 128 bestand weiter, die direkt geförderten Untersuchungen zur Desorption durch Photonen am Lehrstuhl E 20 (Prof. Menzel) der TU München wurden ebenfalls fortgesetzt.

1. Experiment QWAASS

(M. Roppelt, Ph. Staib, G. Staudenmaier, J. Zinser)

Die Zeitabhängigkeit des Wandbeschusses mit Hilfe eines mechanischen Verschlusses wurde am PULSATOR untersucht. Es wurde gefunden, daß sowohl Wand- und Limitermaterials als auch Sauerstoff während der gesamten Entladungsdauer auf dem Target deponiert wurden / 183 /. Dabei wurden weder am Anfang noch

am Ende der Entladung ein anomales Verhalten beobachtet. Danach wurde QWAASS am PULSATOR abgebaut, im Labor repariert und die Vorbereitungen für die Messungen am TFR getroffen.

Von Mitte März bis Ende September 1976 war QWAASS in Fontenay-aux-Roses am TFR-400. Dabei konnten wertvolle Erfahrungen an dem z. Zt. größten Tokamak Europas gesammelt werden. Aus der Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen sind Mengen

des Niederschlags vom Limitermaterial als Funktion des Abstandes Probe-Plasma besonders geeignet, neue Informationen über den Verunreinigungsfluß zwischen Plasma und Wand zu bekommen.

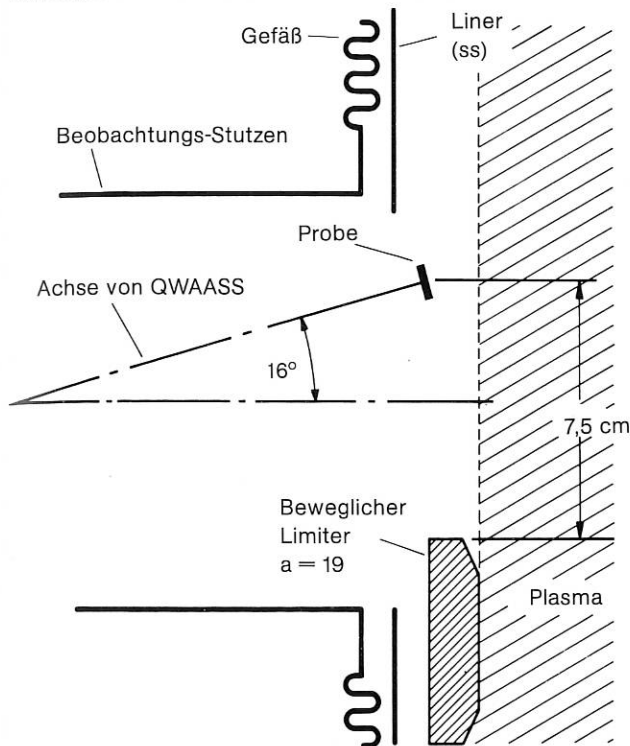


Abb. 1: Anordnung der QWAASS-Probe und der benachbarten Tokamak-Komponenten an TFR 400 (Horizontale Ebene).

Die Einbaugeometrie der QWAASS-Probe ist in Abb. 1 dargestellt. Die Probenposition konnte zwischen erster Wand und Plasma variiert werden, und es stellte sich heraus, daß dieser Abstand wesentlich ist für die Wechselwirkung zwischen Plasma und Probe. Die Probe wurde in Schritten von 5 mm (ausgehend von der Wand) immer näher an das Plasma gebracht. Im Fall eines Mo-Limiters ($a_L = 20$ cm) nimmt die Mo-Menge auf dem Target – gemessen nach jeweils 5 Entladungen – zunächst zu und dann wieder ab (siehe Abb. 2 oberste Kurve). Dabei ist zu beachten, daß die gemessene Mo-Menge nur von der letzten Targetposition abhängt und nicht von vorangegangenen anderen Targetstellungen. Das bedeutet, nahe am Plasma wird mehr Mo abgetragen.

Ähnliche Ergebnisse wie für den Mo-Limiter wurden auch für einen Graphit-Limiter gefunden (Abb. 2). Das Maximum des Mo-Niederschlags liegt immer ungefähr in der Mitte zwischen Plasma und Wand. Auch wenn ein Vergleich der Ergebnisse aufgrund der verschiedenen Plasmaradien und der unterschiedlichen Entladungparameter schwierig ist, bedeutet offensichtlich die Tatsache, daß das Mo-Maximum für den C-Limiter (mittlere Kurve) nur etwa einen Faktor 2 kleiner ist als für den Mo-Limiter, daß bei den Messungen mit dem Mo-Limiter der größere Teil des Molybdän von der Wand kommt. Bei größerem Abstand Plasma-Wand ($a_L = 17$ cm) ist das Maximum wesentlich kleiner.

Besonders aufschlußreich ist die Abhängigkeit des Mo-Niederschlags (nahe am Plasma) von der Anzahl der Entladungen. In allen drei Fällen (vergl. Abb. 3) steigt die Mo-Menge während der ersten fünf Ent-

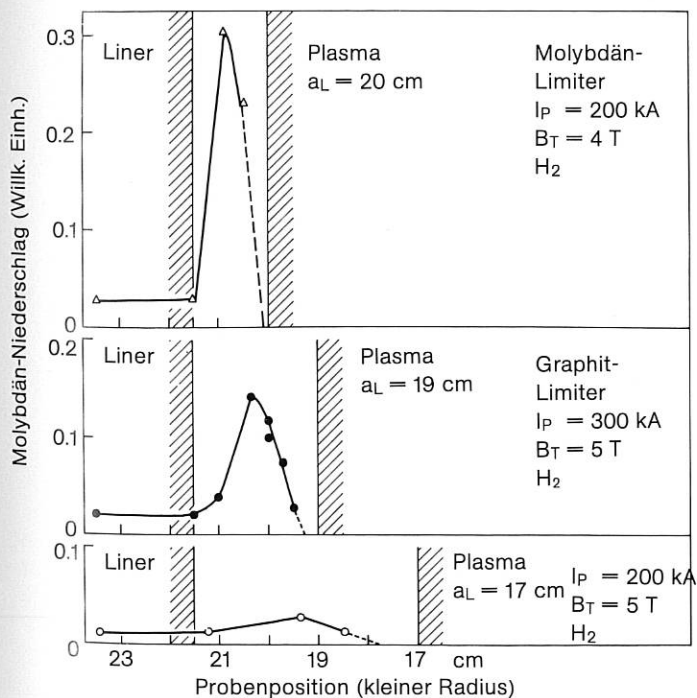


Abb. 2: Menge des auf der Probe aufgesammelten Molybdäns, jeweils nach 5 Schuß, als Funktion der Probenstellung.

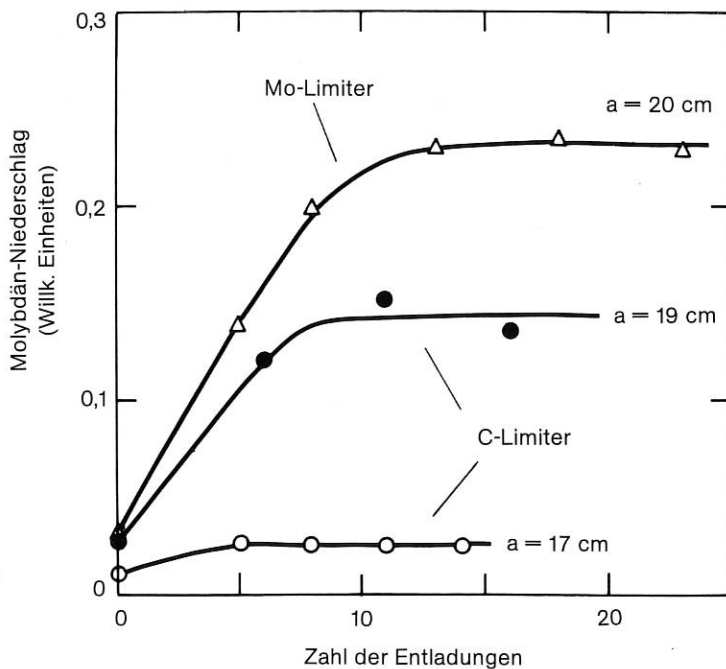


Abb. 3: Menge des auf der Probe aufgesammelten Mo als Funktion der Schußzahl (Position der Probe in der Gegend des Maximums).

ladungen stark an und bleibt nach etwa zehn Entladungen konstant. Dabei ist die Gleichgewichtsmenge kleiner als eine Monolage; d. h. ein vorgetäuschter Sättigungseffekt kann mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Wird statt einer sauberen Probe eine solche mit ca. einer Monoschicht Mo verwendet, so nimmt die Mo-Menge während der ersten fünf Entladungen stark ab und erreicht nach ca. zehn Entladungen den gleichen Endwert.

An diesen Messungen lassen sich im Prinzip (mit Hilfe eines einfachen Modells) zwei sehr wichtige Größen bestimmen: der Verunreinigungsfluß zur Wand und die Erosionsrate als Funktion des Abstandes vom Plasma, gemittelt über eine oder mehrere Entladungen.

In der Auswertung weiterer Untersuchungen, die am TFR gemacht wurden und ihre Verarbeitung zu einem verbesserten Modell der PWW wird noch gearbeitet.

2. Überlegungen zur PWW und Sammlung von Daten

(R. Behrisch, J. Bohdansky, W. Heiland, J. Roth, B. M. U. Scherzer, H. Vernickel)

Mit einem einfachen Teilchenhaltungsmodell wurde der Einfluß verschiedener Quellen von Verunreinigungen in quasistationären Fusionsreaktoren mit magnetischem Einschluß abgeschätzt. Die Zerstäubung des Brennstoffes spielt die größte Rolle, gefolgt von der Selbsterstäubung. Unter der Annahme, daß Blistering und Exfoliation durch He vernachlässigbar ist, ist die Erosion durch He weniger wichtig. Die Zerstäubung durch die Neutronen ist vernachlässigbar klein.

Als Eingabedaten für die Computersimulation sowie für quantitative Abschätzungen wurden für die PWW relevante Daten gesammelt und zusammengestellt. Dies sind:

- a) Zerstäubungsausbeuten, besonders für leichte Ionen bis herab zu Schwellenenergie / 179 /.
- b) Daten über die Ionenrückstreuung. Aus den wenigen vorhandenen Daten wurden Energieverteilungen der rückgestreuten Ionen durch Interpolation und Extrapolation gewonnen / 144 /.

Spezielle Aspekte von Vakuumsystemen für Fusionsexperimente wurden diskutiert / 158 /.

3. PHARAO, BOMBARDINO, 2,5 MV-Beschleuniger

(R. Behrisch, R. Heilmeyer, G. Maderlechner, M. Risch, J. Roth, H. v. Seefeld, B. M. U. Scherzer, H. Schmidl, S. Schrapel, H. Wacker, A. Wiederer)

3.1 Der Aufsammelmechanismus von He in Nb

wurde mit Hilfe des Austausches vom implantiertem ^3He durch ^4He und umgekehrt untersucht. Es zeigte sich, daß das zuerst implantierte Isotop erst dann verdrängt wird, wenn die Gesamtkonzentration ihren Sättigungswert erreicht hat (30–50 Atomprozent). Der Austausch erfolgt nach einer einfachen Mischungsregel.

Für diese Messungen wurde eine Methode zur Tiefenprofilbestimmung von ^4He , die $^4\text{He}(p,p)^4\text{He}$ Reaktion, verwendet. Diese Methode ist für Targetmaterialien mit $Z \leq 50$ anwendbar.

Die zur Bestimmung von Tiefenprofilen notwendigen Energieverlustquerschnitte in Au und Nb wurden mit Hilfe der Rückstreuung von kalibrierten Au-Filmen gemessen.

3.2 Der Einfluß der Zerstäubung und der Blisterbildung auf die Wandererosion

bei sehr hohen Beschußdosen ($\geq 10^{20}$ He/cm²) wurde am Beispiel He⁺ auf Nb bis zu Ionenenergien von 100 keV untersucht, was besonders im Zusammenhang mit Neutralteilchenheizung wichtig ist. Wie bereits früher für niedrige Energien (< 10 keV) gefunden wurde, verschwinden die Blister nach einer Dosis, die zur Zerstäubung der Deckeldicke notwendig ist. Es bildet sich eine poröse Oberflächenstruktur (Abb. 4) / 147 /.

Der Übergang vom Blisterzustand zur porösen Struktur erfolgt rascher, wenn die Ionen mit einer isotropen Winkelverteilung einfallen.

Messungen der Blisterbildung wurden für He an Eisen-Nickel-Chrom-Legierungen, Nickel und Niob für Energien bis 100 keV und Einfallswinkel bei 80° zur Oberflächennormale fortgesetzt. Bei hohen Stromdichten zeigt sich ein deutlicher Einfluß der Ionenstromdichte auf die Oberflächentopographie infolge der Aufheizung der Blisterschicht durch den Ionenstrom.

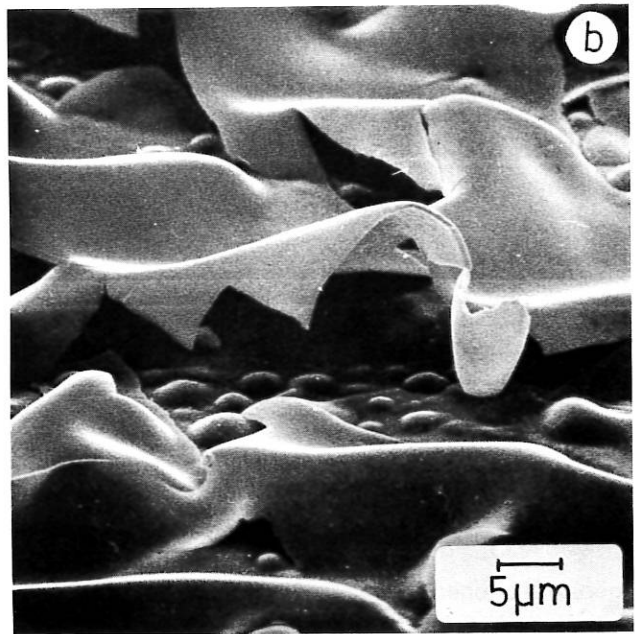
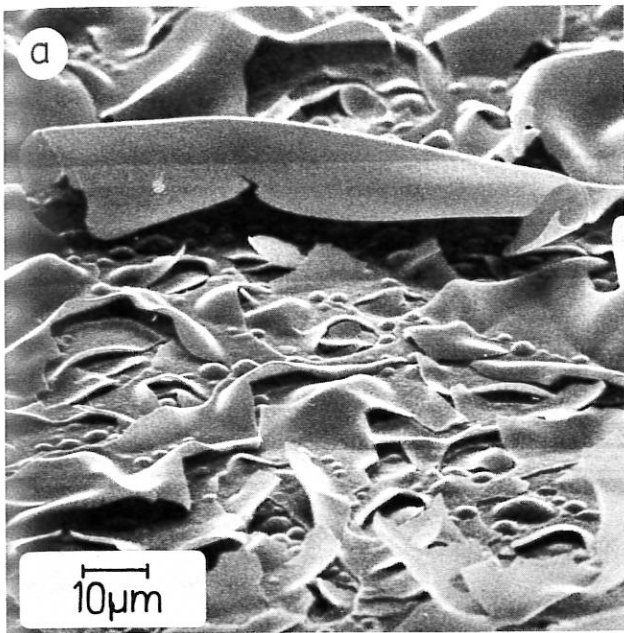
Der Mechanismus der Blisterbildung und der Unterschied zwischen Blistering und Exfoliation konnte durch ein Kontinuum-mechanisches Modell teilweise erklärt werden.

3.3 Zerstäubung von Legierungen und Verbindungen

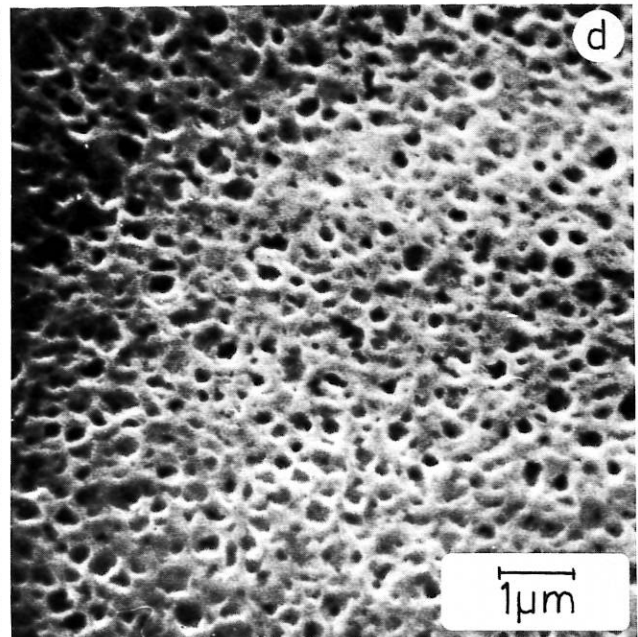
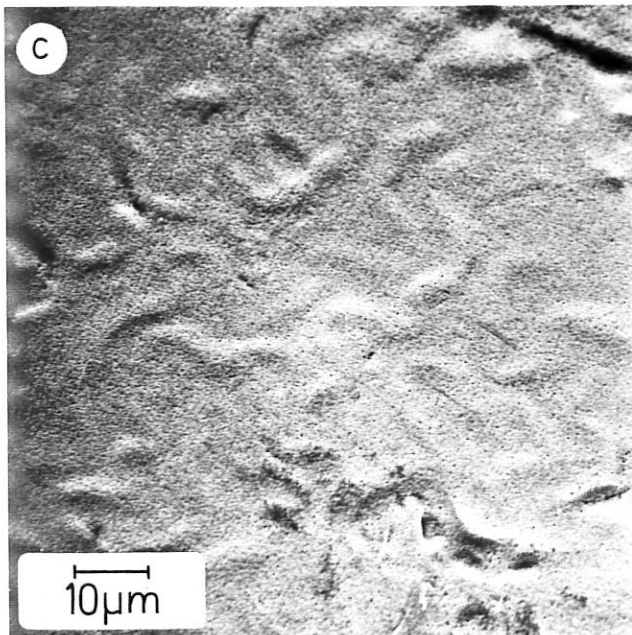
Die Messungen zum Zerstäubungsverhalten von Oxyden (Ta₂O₅, Nb₂O₅) wurden an einer modifizierten Meßkammer weitergeführt. Hier ist es möglich, die beschossenen Oberflächen mit **RBS**, **ISS** und Augerspektroskopie zu untersuchen. Die gemessenen Zerstäubungsausbeuten der Oxyde liegen in der gleichen Größenordnung wie die Zerstäubungsausbeuten der reinen Metalle. In einer Oberflächenschicht, deren

*) Gast von CCR EURATOM, Ispra (Italien)

100 keV $^3\text{He}^+ \rightarrow \text{Nb}$, senkrechter Einfall



$1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$



$1.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$

Abb. 4: Oberflächenstruktur von Niob nach Beschuss mit $100 \text{ keV } ^3\text{He}$ -Ionen.
(a, b) Exfoliation nach $10^{19} \text{ } ^3\text{He}^+/\text{cm}^2$
(c, d) Gleiche Probe nach $1,2 \times 10^{20} \text{ } ^3\text{He}/\text{cm}^2$ mit poröser Oberflächenstruktur.

Dicke etwa der Reichweite der eingeschossenen Ionen entspricht, zeigt sich eine starke Verarmung von Sauerstoff (siehe Abb. 5).

3.4 Rechnungen über Reichweiten, deponierte Energie und Zerstäubungsausbeuten deponierter Energie

Mit dem Programm RADELI wurde die deponierte Energie in der Oberfläche von Eisen beim Beschuß mit H, D, T und He berechnet. Es zeigte sich, daß diese auf Grund der Transporttheorie für die deponierte Energie ermittelten Werte zu hoch und damit für die Berechnung von Zerstäubungsausbeuten ungeeignet sind. Daher wurden mit dem Computer-Simulationscode MARLOWE Rechnungen gemacht. Erste Ergeb-

nisse zeigen qualitative Übereinstimmung mit den experimentell gemessenen Zerstäubungsausbeuten.

Die Rechnungen mit dem Computer-Simulationsprogramm MARLOWE haben weiterhin detaillierte Ergebnisse über den Einfluß der Kristallstruktur, des elektronischen Energieverlustes und der Temperatur auf die Reichweiten- und Strahlenschädenverteilungen beim Beschuß von Nb mit He geliefert / IPP 9/20 /.

Die Simulation eignet sich auch zum Test und zur Verbesserung der analytischen Theorie (Programm) RADELI / IPP 9/21 /). Der Einfluß der Oberfläche auf die Tiefenverteilungen der deponierten Energie wurde mit beiden Methoden untersucht / 169 /. Die Momente der Tiefenverteilung in amorphen Festkörpern stimmen überein / 170 /.

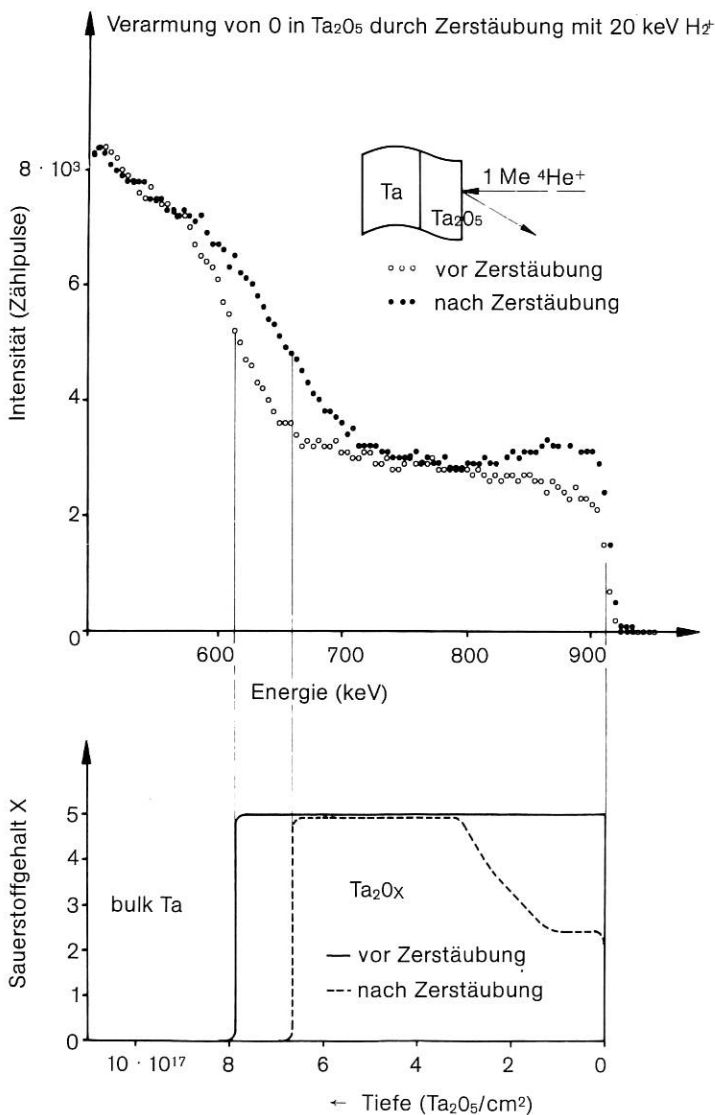


Abb. 5: Zerstäubung von Tantaloxyd durch Protonen
 a) Rutherford-Rückstreuenspektren vor und nach der Zerstäubung
 b) Abnahme des Sauerstoffteils X in Ta₂O_x durch Zerstäubung als Funktion der Tiefe.

4. BOMBARDON

(R. Blume, W. Eckstein, R. Hippele, P. Matschke, S. Schrapel, H. Verbeek)

Die Rückstremessungen von Wasserstoff an Metalloberflächen wurden fortgesetzt. Insbesondere wurden die Energieverteilungen der rückgestreuten Wasserstoffatome (Neutralteilchen und Ionen) für Edelstahl und Niob quantitativ gemessen. Durch Integration der Energiespektren wurden die Teilchen- und Energierückstreuoeffizienten gewonnen (siehe Abb. 6). Für Edelstahl ist die Übereinstimmung mit anderen Autoren, die mit einer anderen Methode arbeiten, und mit den Computer-Simulationen in Oak Ridge gut. Für Nb ergaben sich – wie auch in anderen experimentellen Arbeiten – deutlich kleinere Werte, als man nach den Rechnungen erwartete. Die Form der Energiespektren für Primärenergien von 2,5 bis 15 keV entspricht den Computer-Simulationen; sie zeigen ein deutliches Maximum bei Energien um 1,5 keV. Zusammen mit den Ergebnissen der Computer-Simulation lassen sich jetzt für Primärenergien von 50 eV bis über 10 keV (bei senkrechtem Einfall) die absoluten Rückstreuintensitäten und deren Energieverteilungen angeben, so daß man sie bei Plasmamodellberechnungen einsetzen kann.

Aus den Energieverteilungen der rückgestreuten Ionen und Neutralteilchen wurden die Ladungsverteilungen bestimmt. Es zeigte sich – wie schon früher –, daß der Anteil der als Ion Zurückgestreuten sehr empfindlich von der Oberflächenbelegung der Proben abhängt / 152 /. Um diese Einflüsse zu studieren, wurden Messungen im Vakuum von unter 10^{-10} Torr gemacht. Die Oberflächen konnten durch LEED und Auger-Elektronenspektroskopie charakterisiert werden. An einem Goldkristall mit sehr sauberer Oberfläche wurde festgestellt, daß die Ladungsverhältnisse von der Orientierung des Kristalls bezüglich des einfallenden Strahls und der Beobachtungsrichtung für die zurückgestreuten Teilchen abhängen. Dabei zeigte sich, daß die Ladungsverhältnisse nicht nur wie bei polykristallinem Metall von der Oberfläche des Kristalls

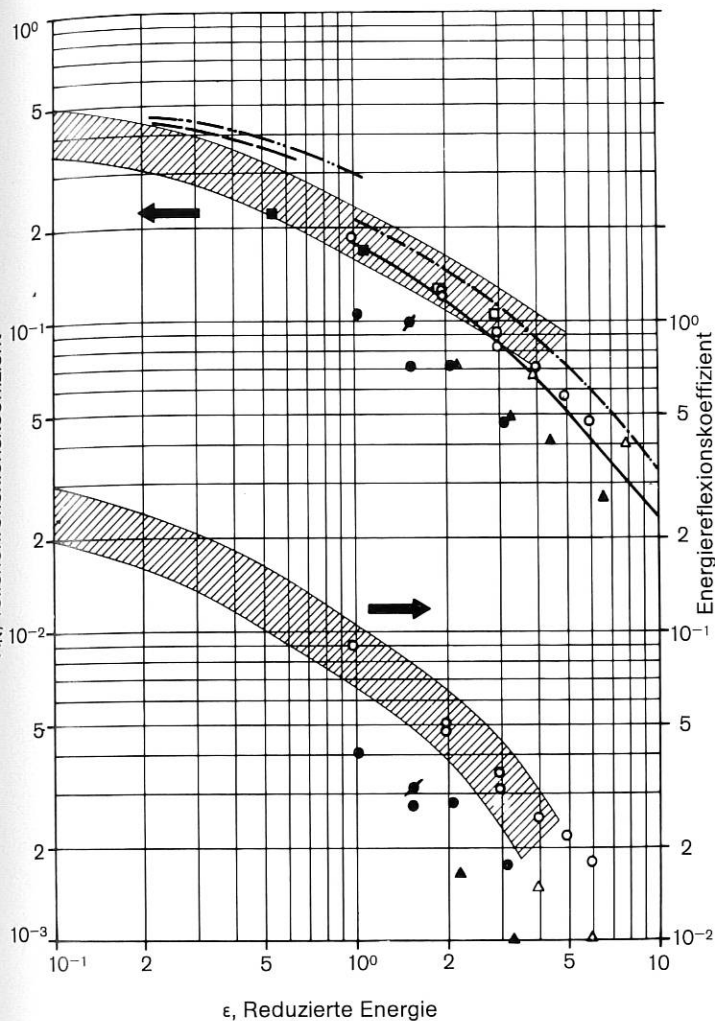
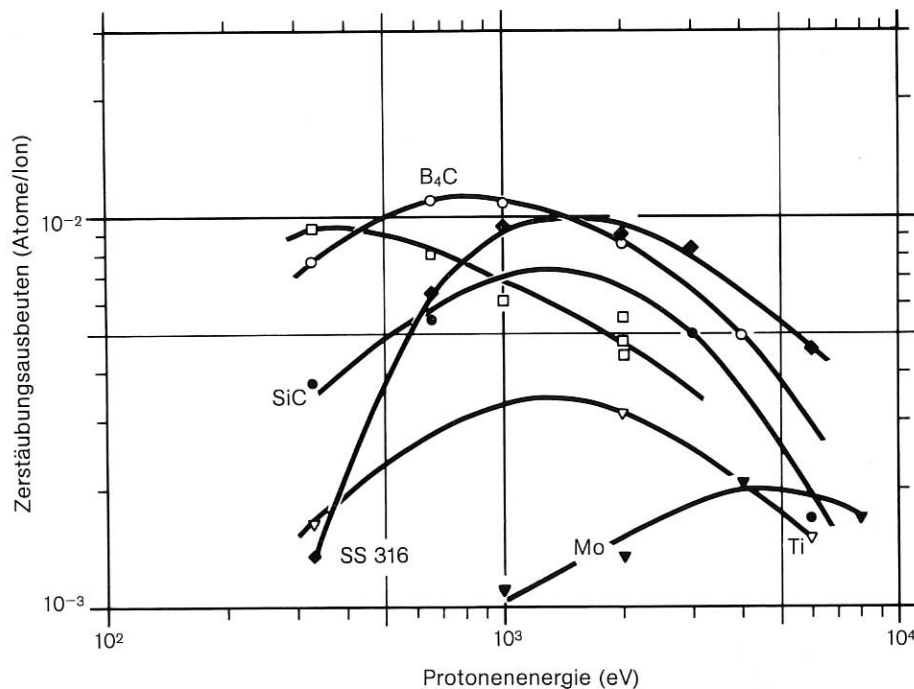


Abb. 6:
 Teilchen- und Energie-
 reflexionskoeffizient als
 Funktion der reduzierten
 Energie ϵ ($\epsilon \propto E$) ■ D → Nb,
 □ → D Edelmetall O ····· H
 Edelmetall (SS 316), ● H → Nb,
 Sidenius et al. (Kopenhagen)
 Δ H → SS, ▲ H → Nb.
 Gestrichelt: Computer-
 simulation, Linien:
 Analytische Theorien.

Abb. 7:
 Energieabhängigkeit der
 Zerstäubungsausbeute
 verschiedener Materialien
 bei senkrechtem Beschuß
 mit Protonen.



bestimmt werden, sondern, daß auch die Tiefe, aus der die Teilchen rückgestreut werden, einen Einfluß hat.

In Zusammenarbeit mit der Universität Brüssel wurden einige Messungen der Streuung von Edelgasionen an Ni-Einkristallflächen vorgenommen, wobei wieder sowohl die geladenen als auch die neutralen Ne-Atome registriert wurden. Aus diesen Messungen können Rückschlüsse auf den Streumechanismus gezogen werden. Die dabei direkt bestimmten Ladungsverhältnisse in Abhängigkeit von der Energie sind wichtig für das Verständnis von ISS (Ion-Surface-Scattering) als oberflächenanalytischer Methode.

5. Hochstromionenquelle

(H. Bay¹⁾, J. Bohdanský²⁾, W. Ottenberger, W. Poschenrieder, J. Roth, M. Sinha³⁾)

Verbesserungen an der Hochstromionenquelle ermöglichen nunmehr Messungen zur Wanderosion und Gasaufzehrung bei Ionenenergien von 8 keV bis 50 eV. Bei diesen Messungen wurde vor allem das Verhalten bei verschiedenen Temperaturen und bei sehr niedrigen Teilchenenergien untersucht.

5.1 Wanderosion

Die Energieabhängigkeit der Wanderosion bei senkrechtem Beschuß mit Wasserstoff wurde für verschiedene Limiter und Wandmaterialien gemessen (Abb. 7).

¹⁾ Gast von der Universität Aarhus (seit 1. Juli 1976)

²⁾ Gast von CCR EURATOM, Ispra (Italien)

³⁾ Gast (seit September 1975) von der North Dakota State University, Fargo, USA

Zur Bewertung der Materialien muß man gleichzeitig die durch diese Materialien verursachten Strahlungsverluste des Plasmas berücksichtigen. Als Gütefaktor kann man das Verhältnis von maximal zulässiger Verunreinigung zur Zerstäubungsausbeute betrachten / 149 /.

Daraus folgt, daß bei hohen Protonenenergien Nieder-Z-Materialien eindeutig günstigere Eigenschaften besitzen. Gelingt es jedoch, die Plasmarandschicht auf niedrigere Temperaturen zu halten (< 500 eV), wäre die Verwendung von Edelstahl oder Mo keineswegs mit einem Nachteil hinsichtlich der Plasmaverunreinigung verbunden. Da in Reaktoren die Wandererosion durch D, T und He verursacht wird, wurde die Erosion verschiedener Materialien auch mit D, ^3He und ^4He durchgeführt. Diese Messungen wurden bis zu sehr niedrigen Energien ausgedehnt.

Die Zerstäubungsausbeute für Mo ist in Abb. 8 gegeben. Empirisch wurde aus diesen Messungen gefunden, daß die Zerstäubungsausbeute in der Nähe der Schwelle mit E/E_s skaliert, wobei E_s die aus einem Zweierstoßmodell theoretisch abgeleitete Zerstäubungsschwelle ist.

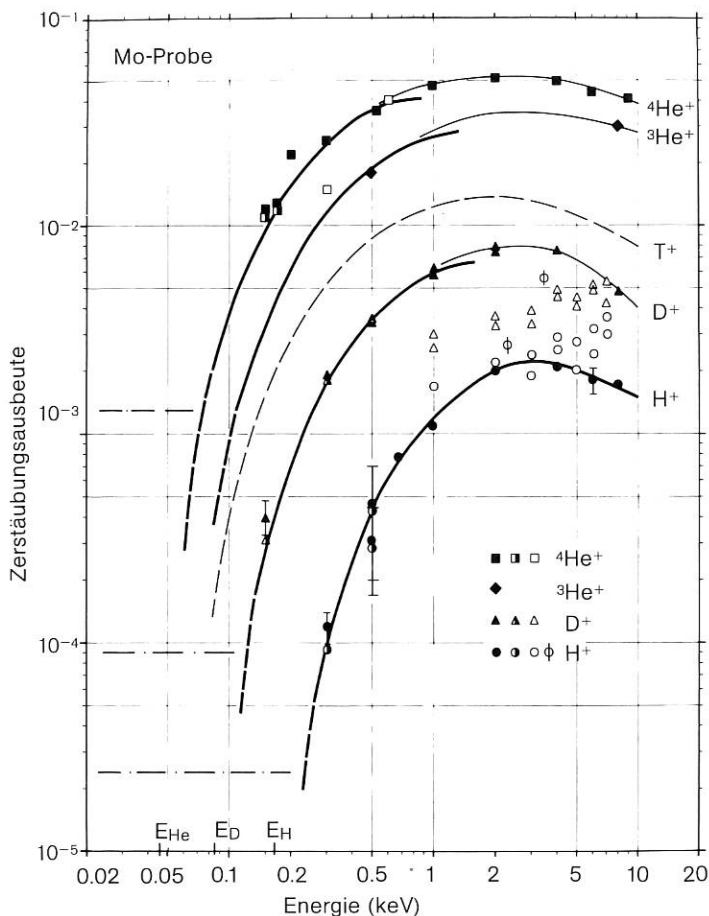


Abb. 8: Energieabhängigkeit der Zerstäubungsausbeute von Mo bei senkrechtem Beschuß mit H^+ , D^+ , $^3\text{He}^+$ und $^4\text{He}^+$ Ionen.

Es wurden auch Untersuchungen über die Erosion von SS 316 bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Dabei zeigte sich ein Anwachsen der Zerstäubungsausbeute im Bereich von 300°C – 500°C . Ein solches Verhalten tritt bei reinen Metallen nicht auf und ist bei SS 316 wahrscheinlich durch eine beginnende Diffusion der verschiedenen Komponenten der Legierung auf der Oberfläche (oder im Volumen) verursacht. Analysen der oberflächennahen Schicht unterstützen diese Annahme. Jedoch sind zu einer endgültigen Klärung weitere Messungen notwendig.

5.2 Gasaufzehrung

Messungen zur Gasaufzehrung bezogen sich auf die Temperaturabhängigkeit dieses Effekts in Ti und Zr. Darüber hinaus wurde die Gasaufzehrung von Ta gemessen. In allen Fällen ist die Gasaufzehrung bis zu einer kritischen Temperatur konstant und sinkt dann auf kleinere Werte ab / 150 /. Dieses Verhalten steht in qualitativer Übereinstimmung mit Messungen anderer Autoren, jedoch scheint die kritische Temperatur von der Reinheit der Probe und vielleicht auch der Vakuumbedingungen abzuhängen. Es wurde auch das Verhalten von Ti-Filmen bei Protonenbeschuß untersucht, wobei möglichst die Bedingungen im ASDEX-Divertor simuliert werden sollten. Bei diesem Versuch zeigte sich bei hohen Beschußdosen ($> 3 \times 10^{19}$ Ionen/cm 2) ein Abschälen des Films (Dicke 4000 Å), was durch eine Hydridbildung erklärt werden kann.

6. SORBAS (Rückstreuung niederenergetischer Ionen)

(U. Beitat¹), B. Dietlmeier, W. Heiland²), H. Hupfloher, G. Marin³), F. Schuster, E. Taglauer, A. Zartner)

6.1 Desorption durch Ionenbeschuß

Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen zur Zerstäubung oder Desorption von Adsorptionsschichten wurden weitergeführt. Es wurden Desorptionsquerschnitte für die Adsorbate S, O, CO auf Nickeloberflächen mit $^3\text{He}^+$, $^4\text{He}^+$, Ne^+ und Ar^+ Ionen im Energiebereich zwischen 200 eV und 2000 eV gemessen. In den meisten Fällen konnte befriedigende Übereinstimmung mit den Modellrechnungen (Rechenprogramm MORLAY) erzielt werden. Rechnungen wurden auch für H^+ -Ionen durchgeführt. Für die schwereren Ionen steigen die Desorptionsquerschnitte mit zunehmender Primärenergie im beobachteten Energie-

1) Ab 1. Dezember 1976

2) Beurlaubt zu Bell Labs, Murray Hill, N. J., USA (vom 15. Januar bis 15. Dezember 1976)

3) Gast vom Institut für Atomphysik, Bukarest, Rumänien (bis 30. September 1976)

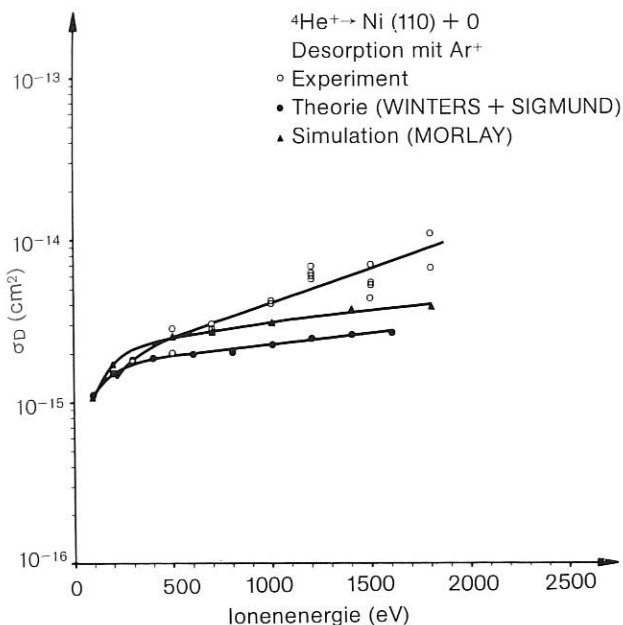


Abb. 9: Desorption von Sauerstoff auf Nickel (110) durch He^+ -Rückstreuung). Vergleich zwischen Theorie und Experiment.

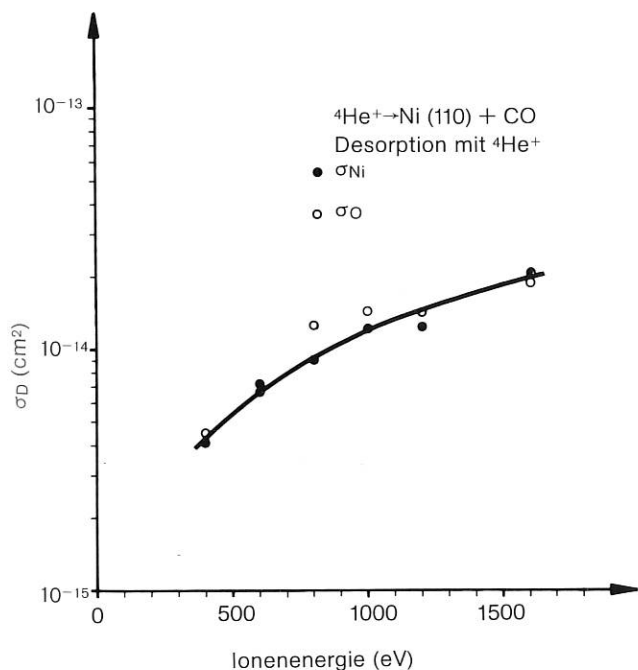


Abb. 10: Desorption von CO auf Ni (110) durch He^+ -Be-schuß.

bereich an, sie liegen in der Größenordnung zwischen 10^{-15} und 10^{-14} cm^2 (Abb. 9). Die Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie Einschubwinkel, Bindungsenergie, Kristallorientierung und Massenverhältnis wurde untersucht. Die Bindungsenergie der adsorbierten Atome oder Moleküle ist von entscheidendem Einfluß auf die Größe des Desorptionsquerschnitts. Der Desorptionsquerschnitt hat ein Maximum bei einem Einschubwinkel von etwa 30° zur Oberfläche / 171 / 184 /.

Für die leichteren Ionen zeigt sich kein einheitliches Verhalten als Funktion der Primärenergie. Teilweise wurden schwach abnehmende Desorptionsquerschnitte oberhalb 50 eV gefunden. Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß die Desorption in diesen Fällen mehr vom Stoßquerschnitt bestimmt ist, der mit zunehmender Energie kleiner wird, als von der im Festkörper erzeugten Stoßkaskade, d. h. von der insgesamt deponierten Energie. Für S und O auf Ni ist der Wirkungsquerschnitt von der Größenordnung 10^{-16} cm^2 für He^+ . Für CO auf Ni, das nur eine Bindungsenergie von etwa 1 eV hat, wurden allerdings wesentlich höhere Werte gefunden, die mit der Energie ansteigen (Abb. 10).

6.2 Untersuchungen zur Ionenrückstreuung

Im Rahmen der Untersuchungen zur Ionenrückstreuung wurden Messungen zur Neutralisation begonnen. Insbesondere sollen die Oszillationen in der Ionenausbeute, die bei der Rückstreuung an einigen Materialien auftreten, näher untersucht werden. Erste Messungen hierzu wurden mit He^+ an Bleioberflächen durchgeführt, Oszillationen wurden auch an aufgedampften PB-Schichten gefunden. Die Messungen erwiesen sich als sehr zeitraubend, weshalb eine Automatik entwickelt und aufgebaut wurde. Sie gestattet es, die Primärenergie in der Ionenquelle schrittweise über einen gewünschten Energiebereich zu variieren, wobei jeweils die Ionenquelle auf optimalen Targetstrom nachgeregelt wird. Die Meßdaten werden im Vielkanalanalysator erfaßt und zur späteren Verarbeitung auf Magnetband gespeichert.

7. Ionenmikrostrahlsonden

(W. Daser, W. W. Harrison¹), W. O. Hofer, H. Liebl, G. Ritter, A. Schlamp, F. Thum).

Die Untersuchungen an der Universal-Mikrostrahlsonde befaßten sich mit der Analyse wasserstoffbestrahlter Stahlproben, wobei die H-Tiefenverteilung von besonderem Interesse war, der Änderung der Isotopenverteilung bei Zerstäubung²) und, in Zusammenarbeit mit dem MPI für Biochemie, der Sekundärionenanalyse von organischen Substanzen.

¹) Gast von der University of Virginia, Charlottesville, USA (bis August 1976)

²) Mit Prof. G. K. Wehner, Univ. Minnesota, USA

Die Arbeiten mit dem Spiegelkonvertor**) wurden sowohl theoretisch als auch experimentell weitergeführt. Die Berechnung der Ionen- und Elektronentrajektorien (Abb. 11) ist nahezu abgeschlossen / 164 /. Experimentelle Untersuchungen hierzu werden an einer im Betriebszeitraum fertiggestellten Apparatur durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, daß bei Verwendung des Spiegelkonvertors als Teilchendetektor statt der allgemein üblichen SEVs oder CEMs-Sekundär-Ionen-Massenspektrometrie ohne (materiellen) Energiefilter möglich ist. Der Konvertor dürfte damit zu einer wesentlichen apparativen Vereinfachung dieses hochempfindlichen Analyseverfahrens führen.

Die Erprobung und Optimierung des Primärteils der Ionenmikrosonde COALA wurde abgeschlossen. Es

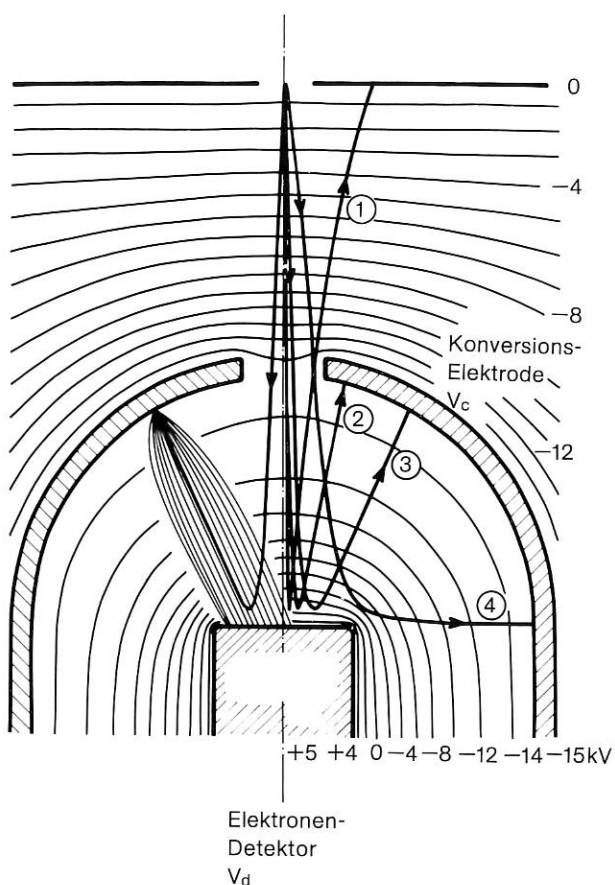


Abb. 11: Äquipotentiallinien, Ionen- und Elektronentrajektorien in einem Spiegelkonvertor mit gekrümmter Konversionselektrode. Die positiven Ionen starten in der Apertur 0 mit einer kinetischen Energie von 1500 eV, die Sekundärelektronen an der Konversionselektrode mit 100 eV.

***) Patentanmeldung des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, Garching

wurde ein Strahldurchmesser von etwa 1000 Å Halbwertsbreite erzielt (siehe Abb. 12 und 13). Der Sekundärteil wurde fertiggestellt und befindet sich in Erprobung.

Die Untersuchungen zum Betrieb einer Duoplasmatron-Ionenquelle mit Hohlkathode für reaktive Gase und Dämpfe wurden abgeschlossen. Es zeigte sich, daß ein I⁻-Strahl hoher Reinheit mit einem Richtstrahlwert vergleichbar mit dem eines Ar⁺-Strahls erzeugt werden kann.

Ferner wurde mit dem Bau des im Vorjahr entworfenen axialsymmetrischen Massenspektrometers begonnen. Testmessungen sollen Mitte 1977 anlaufen.

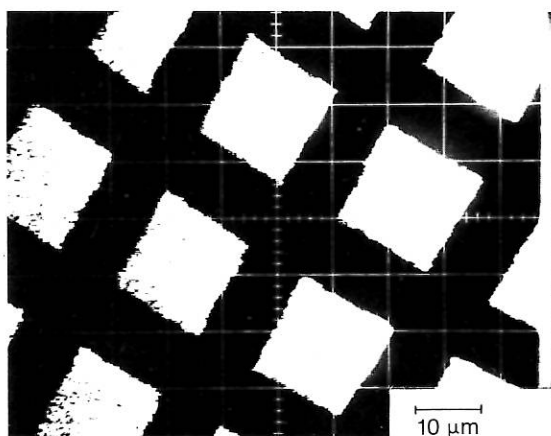


Abb. 12: Ionenrasterbild eines Testgitters, aufgenommen mit COALA.

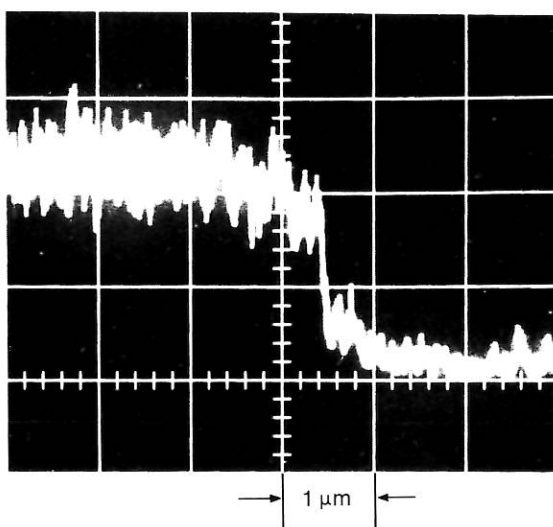


Abb. 13: Oszillographenspur bei Strahlableitung über Testgitterkante (10^{-12} A, keV Ar⁺).

8. Experiment ESCA

(M. Hunger, Ph. Staib, G. Staudenmaier, J. Zinser)

Die Oberfläche von Proben, die in Wechselwirkung mit dem Plasma gekommen sind (Wandproben von Tokamaks oder QWAASS-Proben), fordern eingehende Oberflächenuntersuchungen, um ein möglichst gutes Verständnis zu bekommen. Man möchte sowohl die Zusammensetzung und den chemischen Zustand der Elemente auf der Oberfläche als auch ihre räumliche Verteilung kennen. Die Apparatur KORA (kombinierte Rasteranalysen) wird speziell zu diesem Zweck aufgebaut. Eine konventionelle Rasterelektronen-Mikrosäule (Hitachi HHS-2R) ist mit einer UHV-Kammer versehen worden. Der Elektronenstrahl wird auf ca. 20 nm fokussiert und über die Probe gerastert; damit ist die mikroskopische Abbildung der Probe gegeben (REM). Derselbe Strahl dient auch zu orts aufgelösten Augerelektronenanalysen. Dafür ist ein sehr empfindlicher Energieanalysator entwickelt worden. Für Intensitäten des Rasterstrahles von ca. 5×10^{-8} A wird – entsprechend der üblichen Technik – ein Lock-in-Verstärker zum Nachweis der Augerlinien benutzt. Jedoch können wir mit Hilfe einer neuen elektronischen Technik auch mit viel kleineren Strahlströmen (ca. 3×10^{-9} A) schnelle Augerspektren gewinnen. Die Bilder werden auf ein Raster von 128 x 100 Punkten gemessen und im Kleinrechner gespeichert (ND 812). Wegen des großen dynamischen Bereichs bei der Messung (4096) können sowohl kleine und große Kontraste exakt erfaßt werden. Damit ist ein Weg zum quantitativen Vergleich und Auswertungen geöffnet. Ferner werden die Bilder im IBM-Code auf ein Magnetfeld gespeichert.

9. Spinpolarisierte Elektronen (SFB 128)

(W. Eckstein, K. Ertl, N. Müller, G. Nagleder)

9.1 Feldemission

Messungen mit reinen Wolframspitzen und mit EuS bedampften Wolframspitzen sind durchgeführt worden. Es konnte das Feldemissionsbild, für das aus dem Austrittspotential von 4 eV auf Emission über $4f^7$ -Zustände geschlossen wurde (Jahresbericht 1971), reproduziert werden. Für diesen Emissionstyp konnte ein Maximum in der Energieverteilung gefunden werden, das einer Emission über $4f^7$ -Zustände zugeordnet werden kann (bei 1 eV unter E_F).

9.2 LEED

Die Spinpolarisationsmessungen bei der Beugung langsamer Elektronen an Oberflächen (LEED) wurden in Zusammenarbeit mit *Dr. Wolf vom Institut für Kristallographie und Mineralogie der Universität München* an der Gold(110)-Oberfläche weitergeführt. Die Spinpolarisation verhält sich ähnlich wie bei der Elektron-Atom-Streuung, d. h. Einzelstreuungsprozesse dominieren. Mehrfachstreuungsprozesse machen sich in Strukturen bemerkbar, die der Elektron-Atom-Streukurve überlagert erscheinen. Das Überwiegen der Einzelstreuung ist zu verstehen, über die entsprechend der (2 x 1)-Überstruktur geringere Atomdichte in der obersten Schicht dieser Goldfläche. Die Lage des Maximums bei $\vartheta = 123^\circ$ würde bei Vergleich mit geeigneten Elektron-Atom-Streudaten einen Rückschluß auf die Größe des inneren Potentials erlauben.

Bei Heizen des Kristalls ordnet sich diese Oberflächenschicht um und läßt das stabilere Grundgitter in der korrelierten Streuung dominieren – im LEED-Bild geht die (2 x 1)-Überstruktur in die (1 x 1)-Struktur über. In diesem Grundgitter sind wegen der höheren Zahl nächster Nachbarn Mehrfachstreuungsprozesse wahrscheinlicher, wodurch die Zusatzstrukturen stärker werden.

Bereich Informatik

(Prof. Dr. Friedrich Hertweck)

Im Bereich INFORMATIK werden die folgenden 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 1976 mit meist vier Schichten (24 Std./Tag, 7 Tage/Woche) betrieben (Gesamtbetriebszeit: 7317 Std.). Es wurden 5611 Std. CPU-Zeit abgerechnet. Davon hatte das IPP einen Anteil von 39,8%. Normiert auf die echte Laufzeit von 6859 Std. (d. h. ohne Wartezeiten und durch Systemfehler verlorene Zeiten) ergab sich eine mittlere CPU-Auslastung von 81,6%. Die Systemverfügbarkeit betrug 95,4%.

Da die Rechenanlage seit längerem voll ausgelastet war, wurde Ende 1976 die IBM 370/145 durch eine AMDAHL 470 ersetzt. Die neue Maschine leistet etwa so viel wie die 360/91, so daß mit Beginn des Jahres 1977 das Leistungsangebot praktisch verdoppelt wurde.

Die Arbeiten an den Betriebssystemen dienten im Jahre 1976 zum überwiegenden Teil der Vorbereitung auf die Erweiterung der Rechenanlage. Eine wesentliche Randbedingung war, daß die Peripheriegeräte (Trommeln, Platten, Datenfernverarbeitung, Drucker) beiden Rechnern gemeinsam zur Verfügung stehen sollten. Die Datenfernverarbeitung wurde vor allem durch Einbau eines Plotterpakets in Verbindung mit einem Graphik-Bildschirm für den Benutzer attraktiver gemacht.

Das Projekt Datenerfassung hat die derzeitige DAS-Version (Data Acquisition System) an sieben Experimenten implementiert. Eine zweite Version wurde in Angriff genommen, welche das System in Richtung von mehr Flexibilität, Modularität und Multi-User-Betrieb erweitert. Der direkte Anschluß an die zentrale Rechenanlage wurde in einer ersten Form realisiert.

1. Betrieb der Rechenanlage

(K.-H. Goihl, J. Cox, M. G. Croci, E. Fisser, W. Hüngsberg, H. Kröniger, J. Schneider)

1.1 Betriebsstatistik

Während des Jahres 1976 war die Rechenanlage meistens mit vier Schichten ausgelastet (Mo.-Fr.: 22 Std. + 2 Std. Wartung, Sa. und So.: 24 Std.) entsprechend den personellen Möglichkeiten bei den Operateuren. Lediglich an den Feiertagen (Ostern, Pfingsten und Weihnachten) war die Anlage längere Zeit abgeschaltet. Eine Übersicht über die Betriebszeiten, Wartungszei-

ten, 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.

1.2 Installation der AMDAHL 470

Da die bisher benutzte Rechenmaschine IBM 360/91 mit davorgeschalteter IBM 370/145 schon im Jahre 1975 so stark ausgelastet war, daß keine wesentlichen Kapazitätsreserven mehr vorhanden waren, mußte besonders im Hinblick auf zukünftige neue Anforde-

rungen eine Erweiterung der Anlage geplant werden. Neue Anforderungen werden von den über Datenfernverbindungen angeschlossenen Instituten in Hamburg (MPI für Meteorologie) und in Heidelberg (MPI für Kernphysik) und von dem On-line-Anschluß der Datenerfassungsrechner an den Experimenten im IPP erwartet.

Für die Auswahl der AMDAHL 470/V6 war die Kompatibilität mit der 360/91 bezüglich der bisherigen Peripherie, des Betriebssystems und der Benutzersoftware eine entscheidende Randbedingung, da die 360/91 weiterhin betrieben werden soll und für die neue Maschine ein Teil der schon vorhandenen Peripheriegeräte benutzt werden wird. Die Planung und intensive Vorbereitungen für die Installation wurden von der Betriebsgruppe unter Mithilfe der AMOS-Gruppe in der zweiten Jahreshälfte 1976 durchgeführt. Die AM-

DAHL 470 wurde von der Max-Planck-Gesellschaft bestellt. Die Übergabe an das IPP erfolgte am 21. Dezember 1976, womit der Abnahmetest von 30 Tagen begann.

Die bisher benutzte IBM 370/145 wurde zum 24. Dezember 1976 abgemietet. Dadurch und durch den Ersatz alter Peripherie (Streifenspeicher, Plattenspeicher 2314) durch neue Plattengeräte mit wesentlich geringerem Raumbedarf konnte die neue Maschine ohne Baumaßnahmen im Maschinensaal untergebracht werden. Zu gleicher Zeit wurde auch eine Steuereinheit für Datenfernverarbeitung IBM 3705 durch eine Steuereinheit 1270 von MEMOREX ersetzt.

Die beiden Rechner IBM 360/91 und AMDAHL 470 sind über einen schnellen Datenkanal mittels eines „channel to channel adapter“ gekoppelt, wie dies schon vorher bei der 360/91 und 370/145 der Fall war.

Tabelle 1: Betriebsstatistik 1976 (360/91)

Betriebszeit	7317 : 06	
Laufzeit (Jobs in Ausführung)		6858 : 47
Wartezeit (keine Jobs in Ausführung)		153 : 43
Verlorene Zeit (Software, Hardware)		304 : 36
Wartungszeit	571 : 44	
Betriebssystem (Dump, Restore, usw.)		74 : 53
Hardware		484 : 42
Hilfsaggregate (Klima, Generatoren, Netz usw.)		12 : 09
Maschine abgeschaltet	895 : 10	
Systemverfügbarkeit ((BZ-VZ)/BZ)	95,4%	
Zusätzliche OS-Starts/Werktag	1,4	
Anzahl der Jobs		413 625
Verlorene Jobs (durch Warmstarts, usw.)		1 537
CPU-Zeit		5611 : 22
CPU-Ausnutzung	81,6%	

Erklärung der Begriffe:

Betriebszeit	= Zeit zwischen Übergabe durch Wartungstechniker an Operateure und Betriebsende (Überg. an Techniker oder Abschalten) = Laufzeit + Wartezeit + Verlorene Zeit.	Maschine abgeschaltet	= Zeit, in der die Anlage geplant abgeschaltet wird: Betriebsferien, kein Personal, kein Rechenbedarf.
Laufzeit	= Zeit, in der mind. ein JOB im Arbeitsspeicher ist.	Kalenderzeit	= Betriebszeit + Wartungszeit + Maschine abgeschaltet
Wartezeit	= Zeit, in der (vorübergehend) keine JOBS ausgeführt werden, oder kein Rechenbedarf vorliegt.	Systemverfügbarkeit	= (Betriebszeit - Verlorene Zeit) / Betriebszeit
Verlorene Zeit	= Zeit, die durch Systemstarts, Hardwarefehler (Maschine und Hilfsaggregate), Bedienungsfehler und Reparaturen innerhalb der Betriebszeit, verloren geht.	Zusätzl. OS-Starts/Werktag	= Anzahl aller an Werktagen (norm. Arbeitstage mit vollem Rechenbetrieb) zusätzl. durchgeführten OS-Starts dividiert durch die Anzahl der Werktage in einem Monat.
Wartungszeit	= Zeit, in der Wartungsarbeiten (geplant) an Maschine, Hilfsaggregaten, Betriebssystem usw. ausgeführt werden.	CPU-Zeit	= Zeit, in der die CPU beschäftigt war, ausgewiesen durch das JOB-ACCOUNT (Laufzeit = CPU-Zeit + CPU-Wartezeit).
		CPU-Ausnutzung	= CPU-Zeit/Laufzeit.

Die AMDAHL 470 wird mit dem IBM-System VM/370 betrieben. Damit können in „virtuellen Maschinen“ andere Betriebssysteme nebeneinander laufen. Für den konventionellen Stapelbetrieb steht auf der AMDAHL und auf der 360/91 OS/MVT zur Verfügung. Das AMOS-System wird neben dem OS/MVT in der AMDAHL betrieben. Es ermöglicht den an AMOS-Terminals arbeitenden Benutzern wahlweise den Zugang zu beiden MVT-Systemen. Die zweite Möglichkeit zur Datenfernverarbeitung bieten die RJE-Stationen, die hauptsächlich für Druckausgabe und Plot verwendet werden. RJE-Leitungen können vom Operateur auf Wunsch von einem MVT zum anderen umgeschaltet werden. Außer MVT und AMOS können auf der AMDAHL interaktive Arbeiten durchgeführt werden, von denen vor allem REDUCE zu nennen ist.

Die neue Konfiguration machte eine Reihe von Änderungen an den bisher benutzten Betriebssystemen OS/MVT und AMOS notwendig.

1.3 Betriebssysteme OS/MVT, VM/370 und AMOS

Die Arbeiten an den Betriebssystemen bestanden im Berichtsjahre nur zu einem Teil aus der normalen Systemwartung und kleineren Anpassungen an den Betrieb. Den Hauptteil stellten die Vorbereitungsarbeiten auf die neue Maschinenkonfiguration dar:

- a) Umorganisation der Ausgabe von „Tape-Mount“-Aufträgen an den Bandoperateur, die bisher vom MVT durchgeführt wurde. Die Aufträge werden nun vom AMOS zentral für beide MVT's und AMOS selbst verwaltet und an den Bandoperateur weitergeleitet.
- b) Einbau von Systemmodul zur Unterstützung von 3330-Plattenspeichern am Selektorkanal der 360/91 in das MVT der 91.
- c) Generierung eines VM-Systems für die AMDAHL-Anlage.
- d) Generierung eines MVT-Systems für die AMDAHL-Anlage, mit Modul zur Unterstützung von 3330-Plattenspeichern an Blockmultiplex-Kanälen.
- e) Erweiterung der Funktionen des AMOS bezüglich des Zugangs zu den beiden MVT's: Unterstützung einer zweiten Kanal-Kanalverbindung (virtuell), Wahlmöglichkeit des Benutzers, mit welchem MVT er in Verbindung treten will.
- f) Änderungen im AMOS wegen des Wegfalls des Streifenspeichers und der Erweiterung der Plattenkapazität. Diese Änderungen betrafen speziell die Filemigration, in der der Streifenspeicher eine wichtige Rolle spielte.

1.4 Ausbau der Datenfernverarbeitung

Die Datenfernverarbeitung gewinnt stark an Bedeutung für große Rechenanlagen, deren potentielle Benutzer nicht in unmittelbarer Nähe der Anlage arbeiten. Schwerpunktmäßig wurde daher an dem Ausbau des Service für Datenfernverarbeitungsstationen gearbeitet.

Der Anschluß des MPI für Meteorologie in Hamburg an das IPP-Rechenzentrum mit 3 AMOS-Bildschirmen

und einer Stapelstation (RJE) mit intensiver Mitarbeit des IPP-Rechenzentrums gab die Gelegenheit zu einer Untersuchung über die Möglichkeiten, weit entfernte Benutzer wirksam zu unterstützen. Die Mitarbeit des IPP-Rechenzentrums bestand in

- mehrtägiger Einweisung der Hamburger Benutzer in die AMOS- und RJE-Benutzung,
- umfangreicher Hilfe bei der Programmumstellung von CDC-Fortran auf IBM-Fortran,
- Herstellung eines allgemeinen Konversionsprogramms für den Übergang von TR 440 Magnetbändern in IBM-kompatible Datendarstellung,
- Entwicklung eines Programms zur Ausgabe von Plotdaten auf einem Bildschirm an der RJE-Station.

Die Untersuchung lief über sechs Monate und zeigte ein positives Ergebnis: Es kann sinnvoll sein, auch über weite Entfernungen hinweg an einer großen Rechenanlage zu partizipieren. Der Service für entfernte Benutzer kann fast so gut sein wie am Ort der Rechenanlage. Nicht befriedigend war allerdings der Postversand von Magnetbändern und Ausgabelisten.

Die Kombination von AMOS-Bildschirmplatz mit einer RJE-Station, die mit Druck- und Plotausgabe auf Bildschirm und mit einer Hardcopyeinrichtung für Plot versehen ist, wurde dann auch auf der Hannover-Messe 1976 innerhalb der Innovationschau „Forschung und Technologie“ als IPP-Beitrag ausgestellt.

1.5 Benutzerunterstützung

Die Information der Benutzer über wichtige Entwicklungen geschah regelmäßig durch Bits & Bytes sowie die APL-Nachrichten. Folgende Kurse wurden abgehalten:

- 1) FORTRAN für Anfänger
- 2) Job Control Language
- 3) Benutzung von Dienstprogrammen
- 4) Linkage Editor und Loader
- 5) Overlay-Programme
- 6) IBM FORTRAN-G1 und H-Extended Compiler
- 7) AMOS für Anfänger

Die Beteiligung an den Kursen war rege (30 bis 40 Teilnehmer).

Für die an der IPP-Rechenanlage am häufigsten benutzte Programmiersprache – FORTRAN – wurde durch die Anmietung und Implementierung von drei verschiedenen neueren FORTRAN-Compilern eine breit gefächerte Unterstützung für Programm-Tests, strukturierte Programmierung und Produktionsprogramme bereitgestellt. Es handelt sich um die IBM-Produkte FORTRAN-H-Extended und FORTRAN-G1 und den WATF IV- und „Structured WATF IV“-Compiler der Universität Waterloo.

Die wichtigsten im IPP während des Berichtsjahres entwickelten oder angepaßten Dienstprogramme sind:

- TPDUMP zur parametergesteuerten formatierten Ausgabe von Daten, die auf vielfältige Art auf Magnetband gespeichert sein können.
- GET 400 zur Konversion von TR440-Binärbändern in OS/360-kompatible Bänder.

- AMTRUP – „AMOS-transient updater“ – ein Dienstprogramm zur Veränderung von AMOS-Files und Herstellung von Job-Input aus AMOS-Files für entfernte Benutzer einer Stapelstation ohne AMOS-Terminal.
- ISOFIX Anpassung des im HMI Berlin entwickelten Systems zur grafischen Darstellung von Isolinien an unser Betriebssystem.

2. AMOS-Entwicklung

(F. Hertweck, A. Döderlein, H. Fisser, K.-H. Gohl, R. Pocock, I. Precht, U. Schneider)

Anfang des Jahres wurde die dreistufige File-Migration (Platten – Magnetstreifen – Magnetbänder) in Betrieb genommen und erfolgreich eingesetzt. Gegen

Ende des Jahres wurde der Magnetstreifenspeicher (wegen Überalterung) außer Betrieb genommen und die File-Migration auf zwei Stufen umgestellt.

Die Arbeiten am Message-Controller für die Rechner-Kopplung wurden so weit vorangetrieben, daß zwei FORTRAN Programme auf der 360/91 sowohl Nachrichten als auch Synchronisierungssignale untereinander austauschen konnten. Das Schwergewicht wurde dabei auf die Schnittstelle Programm/Message-Controller gelegt.¹⁾

Die Arbeiten am System AMOS/3 für den Interdata-Rechner wurden fortgeführt. Zum Teil waren auch Änderungen für die Umstellung auf das neuere Modell 7/16 notwendig (anderes E/A-Konzept). Es wurde ein Data-Link-Protokoll entwickelt, welches das neue HDLC-Verfahren anwendet und über einen entsprechenden Modul mit einem FORTRAN-Programm auf dem Zentralrechner verkehren kann. Damit wurde eine einfache Version des File-Transfers implementiert.

Tabelle 2: Anteil der IPP-Projekte an der Rechenzeit

Institut – Kostenstelle – Kostenträger	Rechenzeit – Anteil in %	Institut – Kostenstelle – Kostenträger	Rechenzeit – Anteil in %
IPP DN PHARAO, BOMBARDON BOMBARDINO	55.52.22,17 1,0	IPP TZ Reaktor-Elektrotechnik	0.11.24,86 0,0
IPP DQ Sorbas	12.33.34,91 0,2	IPP TO Technologie allgemein	9.40.28,46 0,2
IPP DR Mikrostrahlsonden	6.36.52,84 0,1	IPP V1 Geschäftsführung	0.07.58,03 0,0
IPP DS Elektronenspektroskopie f. Oberflächenanalyse	0.35.57,00 0,0	IPP V2 Verwaltung	19.12.45,38 0,3
IPP DW Feldemission, LEED	0.00.13,62 0,0	IPP ZE Elektronik	0.00.07,25 0,0
IPP DX Numerische Methoden, Theorie	24.15.35,67 0,4	IPP ZO Allgemein u. Koordination	0.23.06,13 0,0
IPP EA Berechnungen	83.24.41,32 1,5	IPP OA Elektronenring-Beschl.-Schuko	8.36.48,63 0,2
IPP KO Sammelkostenstelle ASDEX	60.18.36,19 1,1	IPP 1A ISAR I	0.03.18,05 0,0
IPP NA Entwicklung num. Verfahren	218.46.57,20 3,9	IPP 1E Hochspannung-Belt-Pinch	195.44.05,89 3,5
IPP NB Numerische Plasmadynamik	901.20.08,83 16,1	IPP 1S Plasmasimulation	0.01.22,07 0,0
IPP NC Reine Theorie	23.56.35,48 0,4	IPP 1X Belt-Pinch 2	3.35.48,58 0,1
IPP N3 Dokumentation	4.25.23,41 0,1	IPP 1Y HBS II	103.19.57,99 1,8
IPP N4 Programmierungsgruppe	6.44.42,86 0,1	IPP 10 Hoch-Beta-Plasmen/allgemein	76.19.33,37 1,4
IPP RD Projekt/Datenerfassung	1.37.32,05 0,0	IPP 13 Auswerte-Gruppe	23.19.40,22 0,4
IPP RO Informatik allgemein	0.05.00,85 0,0	IPP 2B Stellarator W VIIb	0.02.25,48 0,0
IPP R1 Rechenanlage Betrieb	67.15.57,01 1,2	IPP 3P PULSATOR 1	2.13.11,27 0,0
IPP R2 Rechenanlage Systemgruppe	3.49.47,84 0,1	IPP 3S Mikrowellen	0.00.32,71 0,0
IPP R3 AMOS-Entwicklung	3.33.10,38 0,1	IPP 3V ASDEX	0.00.36,47 0,0
IPP R4 Verwaltungsprogrammierung	23.52.45,11 0,4	IPP 30 Tokamaks/allgemein	0.09.17,32 0,0
IPP SB Berechnungen für W VIIa	33.18.00,21 0,6	IPP 4A Dichte LASER-Plasmen	0.00.23,92 0,0
IPP SD Diagnostik	0.08.27,48 0,0	IPP 4C Jod-LASER	0.00.03,59 0,0
IPP SE Teilchen-Einschuß/nur W VII	12.37.58,35 0,2	IPP 4D Chemische LASER	1.02.31,60 0,0
IPP SH Poloidal-feld-Systeme/OH, BZ-Felder	0.08.27,64 0,0	IPP 4E Laser- u. Mikrowellendiagn.	0.37.20,47 0,0
IPP SK Experimentierhalle Betriebsgr.	0.04.06,90 0,0	IPP 4F Liwerex und Towerex	14.51.55,90 0,3
IPP SL Planüberwachung/W VIIa	0.30.53,52 0,0	IPP 40 Exp. Plasmaphysik 4/allgem.	0.00.57,18 0,0
IPP SN Kühlsysteme	0.16.51,23 0,0	IPP 6C Reine Theorie	0.00.12,55 0,0
IPP SX Datenerfassung	0.08.56,68 0,0	IPP 64 Dokumentation	0.00.23,51 0,0
IPP SY Vorexperiment für W VIIa	0.13.50,12 0,0	IPP 8A Dichte Laserplasmen	40.45.53,50 0,7
IPP SZ Theorie/W VIIa	36.58.50,58 0,7	IPP 8B Laserspektroskopie	0.06.09,86 0,0
IPP TN Neutralinjektion	1.55.42,74 0,0	IPP 8C Jodlaser	0.05.45,38 0,0
IPP TQ Laser-Pellet-Quelle	39.08.41,64 0,7	IPP 8D Laserchemie	88.28.05,26 1,6
IPP TS Systemstudien	22.19.25,80 0,4	IPP 80 Hochleistungslaser/allgemein	0.00.17,24 0,0
		IPP 9N Pharaon, Bombardon, Bombardino	0.00.03,00 0,0
		IPP 9T Feldemission, Leed	0.00.00,32 0,0
		IPP Insgesamt im Jahre 1976	2235.58.39,07 39,8

¹⁾ Döderlein, A. und Hertweck, F.: On the Exchange of Messages between Processes, GI-Fachtagung, Aachen, Reihe Informatik Fachberichte 3

Als Hilfsmittel für weitere System-Entwicklungsarbeiten ist die Programmiersprache PL360 erweitert worden. Insbesondere wurde der Prozeduraufruf, welcher bisher entsprechend den FORTRAN-Konventionen implementiert war, auf rekursive und ablaufinvariante Prozeduren umgestellt. Weiterhin wurden moderne Entwicklungen des Software-Engineering, Steuerstrukturen in Programmiersprachen betreffend, mit einbezogen.

Ab Mitte des Jahres wurden im wesentlichen nur noch Arbeiten für die Umstellung des AMOS auf den Betrieb mit zwei MVT-Systemen (auf der IBM 360/91 und auf der AMDAHL 470) durchgeführt (vgl. Abschnitt 1.3).

3. Projekt Datenerfassung

(R. Lathe, D. Engelhardt, F. Hofmeister, K. Kottmann, E. Müller, J. Steuerwald, F. von Woyna)

Die Ziele für 1976 waren:

- Ergänzung der IPP-DAS auf multi-user, multi-tasking Betrieb,
- Kopplung der Datenerfassungsrechner mit der Großrechenanlage,
- Konsolidierung des Geräteangebots zur Erfassung von Meßsignalen,
- Wartung und Vervollständigung aller vom PDE erstellten Systeme.

3.1 Datenerfassungssystem

Die erste DAS-Version wurde bisher an sieben Experimenten implementiert. Um den Anforderungen mittlerer und größerer Experimente hinsichtlich der gleichzeitigen Datenverarbeitung für mehrere Benutzer zu genügen, war es erforderlich, die DAS-Version 1 zu erweitern. Zu diesem Zweck wurde das Konzept der ersten Version überarbeitet. Die Benutzerhandhabung wurde verallgemeinert und vereinfacht. Jede Diagnostik wird einem Benutzer zugewiesen, wobei Zugriffe von anderen (nicht privilegierten) Benutzern durch Passwort-Schutz ausgeschlossen sind. Wie in Version 1 von DAS kann der Benutzer den Status und die Parameter der ihm zugewiesenen Diagnostik abfragen und ändern. Dies kann jedoch jetzt unabhängig von anderen Diagnostiken und dem Experiment-Status ausgeführt werden. Die dynamische Änderbarkeit des Systems ist durch die Implementation ladbarer Gerätetreiber in der zweiten DAS-Version gegeben.

Erwähnenswert ist auch die neue Datei-Struktur. Die aufgenommenen Daten werden in Dateien, die durch Listen von Blöcken dargestellt sind, gespeichert. Hinzu kommt ein Dateiverzeichnis von allen in der Datei enthaltenen Diagnostikdaten. Diese Struktur erlaubt einen schnellen (direkten) Zugriff zu den Daten einer spezifischen Diagnostik.

Im Berichtsjahre wurde die Software, die den minimalen Anforderungen genügt, fertiggestellt. Es können

- die Konfiguration von mehreren Benutzern unabhängig voneinander dynamisch geändert werden,
- Gerätetreiber dynamisch geladen werden,
- Daten aufgenommen und in einer Datei gespeichert werden.

Darüber hinaus wurde Software entwickelt, die die aufgenommenen Daten für die Verarbeitungsprogramme bereitstellt und Zwischendateien für graphische Ausgabe erstellt.

3.2 Rechner-Verbund

Seit Beginn des PDE wurde höchster Wert auf den modularen Aufbau eines für das IPP allgemein einsetzbaren Datenerfassungssystems gelegt. Gleichzeitig wurde die Notwendigkeit erkannt, die einzelnen Experiment-Rechner miteinander und mit der Zentral-Rechenanlage zu verbinden. Solch ein integriertes Datenaufnahme- und Verarbeitungssystem stellt ein wichtiges Hilfsmittel für die rasche Durchführung der Experimente dar. Obwohl die Zweckmäßigkeit des integrierten Konzepts akzeptiert wurde, ist es dem PDE im Jahre 1976 nicht gelungen, diese Aufgabe zu bewältigen, da der lokalen Datenaufnahme und Verarbeitung höhere Priorität eingeräumt wurde.

In 1976 wurde eine Zwischenlösung implementiert, die als eine Art „Magnetband per Telephonleitung“ verstanden werden kann; sie ist nur eine Teillösung, bietet aber die Möglichkeit, Magnetbandgeräte am Experiment einzusparen und Daten mit geringer Geschwindigkeit (z. Zt. 9,6 K Baud) zu und von der Zentral-Rechenanlage zu übertragen. Ein wichtiger Punkt, der für ein integriertes System erforderlich ist – nämlich die direkte Kommunikation zwischen Programmen – ist noch nicht erfüllt.

Im Zusammenhang mit dem erstrebten integrierten System für Datenerfassung mit Verarbeitung an der Zentral-Rechenanlage wurde ein Konzept für ein zentrales Datenarchiv erarbeitet. Ziel dieses Vorhabens ist es, alle aufgenommenen Daten in Form einer Datenbank zentral zu verwalten. Die von den einzelnen Experimentapparaturen aufgenommenen Daten sollen in dem AMOS-File-System gespeichert werden. Die Benutzer sollen dann in die Lage versetzt werden, mit Hilfe eines Abfragesystems ihre Daten auszuwerten und zu vergleichen.

3.3 Hardware-Entwicklung

Die jetzt bekannten Diagnostik-Anforderungen und die Erfahrungen der vergangenen Jahre haben gezeigt, daß die meisten der zu erfassenden Signale sich in wenige Klassen einteilen lassen. Das erlaubt den Einsatz von standardmäßigen Moduln. Der erste Schritt zu einer Normierung wurde vor zwei Jahren durch die Entscheidung, künftige Geräte nur in CAMAC Norm zu entwickeln, unternommen.

In 1976 wurde ein System, bestehend aus elf Primärmoduln, die die Anforderungen der Standard Diagnostiken erfüllen, definiert. Darüber hinaus können alle bekannten Überwachungsaufgaben durch diesen Satz abgedeckt werden. Eine kurze Beschreibung der erforderlichen Moduln folgt:

- ADU:** ultra-schneller Analog-Digital Umwandler (bis zu 500 MHz)
- ADF:** schneller Analog-Digital Umwandler (bis zu 10 MHz)
- ADM:** multiplex Analog-Digital Umwandler mit 100 Mikro-Sekunden Umwandlungszeit pro Kanal (bis 16 Kanäle) (PDE Entwicklung)
- MUX:** Zusatz-Multiplexer (erlaubt die Erweiterung eines ADMs für langsame Vorgänge bis zu 256 Kanälen)
- PPG:** programmierbarer Pulsgenerator (Verwendung mit ADFs bzw. ADMs) (PDE Entwicklung)
- TMR:** programmierbarer Timer (Weiterentwicklung des PPG Moduls)
- MEM:** 2 K oder 4 K Wort- (à 16 Bit) Speicher für Zwischenspeicherung von Ein- oder Ausgabedaten (PDE Entwicklung)
- QD8:** spezieller Modul zur Aufnahme von Thompson-Streuungsdaten
- IOR:** digitaler Ein-/Ausgaberegister-Modul für den Anschluß spezieller Geräte
- DAC:** Digital-Analog Umwandler für Gerätesteuerung
- CMP:** digitales Vergleichsmodul für Überwachungsfunktionen mit 64 Eingängen.

Gespräche mit Fachleuten von anderen Instituten und JET haben nahegelegt, noch vier weitere Interface-Moduln zu definieren.

Im Berichtsjahre wurden die PPG und MEM Moduln entwickelt, getestet und zum Teil eingesetzt. Ebenfalls wurden die für das QD8 erforderlichen Steuergeräte

entwickelt und eingesetzt. Neben den Arbeiten für Standardmoduln wurde ein spezielles Gerät für das Experiment LPQ entwickelt (Stoppuhr). Dieses Gerät dient zur Messung kurzer Zeitintervalle.

4. EDF für das Rechnungswesen

(D. Seewald, L. Döring)

Im Berichtsjahre wurden neben der laufenden Programmpflege und der Verarbeitung der angelieferten Daten folgende Erweiterungen des EDV-Systems durchgeführt:

- Die Ausgliederung der Projektgruppe Laserforschung aus dem IPP machte die Erweiterung auf mehrere Buchhaltungen erforderlich. Zu diesem Zweck wurde die Datenhierarchie um eine dritte Stufe erweitert. Die entsprechenden Programme mußten angepaßt werden.
- Das Bestellobligo ist jetzt voll in das System integriert. Mit dem Buchen der Rechnungen wird die jeweilige Bestellung automatisch ausgeglichen.
- Die Fertigungsabrechnung wurde hinsichtlich des Wirtschaftsplans flexibler gestaltet. Laufende Fertigungsaufträge können nun aus dem Investitions-haushalt in den Betriebshaushalt gebucht werden und umgekehrt.

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

Benutzung der IPP-Rechenanlage im Jahre 1976	Rechenzeit	Anteil %	Jobanzahl	Anteil %
IPP MPI für Plasmaphysik, Garching	2235:58'39"	39,85	142 487	34,45
MAE MPI für Ionosphärenphysik, Lindau/Harz	4:47' 4"	0,09	373	0,09
MEL MPI für Biochemie, Martinsried	38:30'44"	0,69	2 039	0,49
MFK MPI für Festkörperforschung, Stuttgart	3:36'54"	0,06	453	0,11
MPA MPI für Astrophysik, München	1609: 5'10"	28,68	75 500	18,25
MPC MPI für Chemie, Mainz	61:37'53"	1,10	1 541	0,37
MPE MPI für extraterrestische Physik, Garching	234:33'51"	4,18	29 339	7,09
MPM MPI für Meteorologie, Hamburg	17: 7'30"	0,31	5 821	1,41
MPP MPI für Physik, München	809: 0'41"	14,42	38 868	9,40
MPS MPI für Psychiatrie, München	35: 6'19"	0,63	12 304	2,97
MFP Forschungsstelle für Psychopat. u. Psychotherapie, München	0: 2'46"	0,00	36	0,01
MMF MPI für medizinische Forschung, Heidelberg	4:22'41"	0,08	417	0,10
DAT Dokumentation und Ausbildungszentrum, München	0:22' 9"	0,01	340	0,08
DFV DFV für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen	2:50'58"	0,05	741	0,18
DJI Deutsches Jugendinstitut, München	0:29'29"	0,01	656	0,16
IFO Institut für Wirtschaftsforschung, München	5:55'34"	0,11	2 659	0,64
LHM Stadtentwicklungsreferat Landeshauptstadt München	6: 1'52"	0,11	1 969	0,48
IOS Osteuropa-Institut, München	1: 6'19"	0,02	859	0,21
OSR Fa. Osram GmbH, München	0:12'29"	0,00	12	0,00
SBP Staatsinstitut für Bildungsplanung, München	2:34' 6"	0,05	2 153	0,52
THM Technische Universität, München	358:51'34"	6,40	57 150	13,82
THP Physikdepartment der techn. Universität, München	71:15'22"	1,27	18 398	4,45
UMU Universität München, München	75:28'59"	1,35	14 395	3,48
WIS Kommission für Tieftemperaturforschung, Garching	0:41'27"	0,01	468	0,11
GIM Goethe-Institut München, München	3:39' 0"	0,07	2 075	0,50
HBW Hochschule der Bundeswehr, München	0:41'20"	0,01	114	0,03
UNE Universität Erlangen, Erlangen	27:21' 2"	0,49	2 458	0,59
Summe aller Institute	5611:21'51"	100,0	413 625	100,00

Bereich Relativistische Plasmen

(Prof. Dr. Arnulf Schlüter)

Im Herbst 1974 konnte zum ersten Male zweifelsfrei nachgewiesen werden, daß ein Ring aus relativistischen Elektronen längs seiner Achse so beschleunigt werden kann, daß in ihm eingelagerte Ionen mitbeschleunigt werden. In dem damaligen Experiment SCHUKO war die Beschleunigungsstrecke nur etwa 10 cm lang, so daß die Ionenenergien nur den Bereich von 200 keV erreichen konnten. Aufgrund dieses Ergebnisses wurde im Jahre 1975 mit PUSTAREX ein neues Experiment mit einer längeren Beschleunigungsstrecke in einem statischen Magnetfeld entworfen und wesentliche Teile im Jahre 1976 hergestellt. Die Vorbereitung dieses Experiments und abschließende Versuche an SCHUKO bildeten den Schwerpunkt der Tätigkeit des Bereiches Relativistische Plasmen im Berichtsjahre.

(C. Andelfinger, E. Buchelt, W. Dommaschk, J. Fink, W. Herrmann, I. Hofmann, D. Jacobi, P. Merkel, H.-B. Schilling, U. Schumacher, M. Ulrich)

1. Elektronenring-Beschleuniger-Experiment SCHUKO

Der Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen am Elektronenring-Beschleuniger-Experiment SCHUKO lag im Berichtsjahre auf der Verbesserung der Elektronenring-Qualität, um zu größeren Werten für die Haltefeldstärke zu kommen als sie in den ersten Beschleunigungsmessungen gefunden wurden.*) Diese Feldstärke, mit der die zu beschleunigenden Ionen an den Elektronenring gebunden werden, bestimmt direkt, welchen Energiegewinn pro Längeneinheit man mit dieser Beschleunigungsmethode gewinnen kann.

Die Ursachen der Verluste an Ringqualität sind ohne erhebliche Verbesserungen und Erweiterungen der Diagnostikmöglichkeiten quantitativ schwer feststellbar. Der Wert der Haltefeldstärke wird im wesentlichen bestimmt durch die Eigenschaften des injizierten Elektronenstrahls (Energie als Funktion der Zeit, momentane Energiebreite, Stromdichte und Emittanz), durch die Effektivität des Elektroneneinfangs bei der Ringbildung und die dabei wirkenden kollektiven Felder und durch Elektronenverluste sowie Aufweitung der kleinen Ringdimensionen während der Kompression, beim Herausrollen des Ringes und bei seinem Einlaufen in die Beschleunigungsstrecke. Teilchenverluste und Ringaufweitung sind wahrscheinlich Folge von kollektiven Instabilitäten des Elektronenringes in longitudinaler und transversaler Richtung; dabei spielt die Wechselwir-

kung der kollektiven Felder mit der Umgebung bei der "resistive wall" Instabilität und die mit den Ionen bei der Elektronen-Ionen-Instabilität eine entscheidende Rolle. Diese kollektiven Instabilitäten sind meist mit Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen der für den Instabilitätstyp charakteristischen Frequenzen verbunden, die mit magnetischen Induktionssonden gemessen werden. Diese Sonden messen nicht allein den hochfrequenten Anteil des den Elektronenring umgebenden Magnetfeldes, sondern auch den mit der Kompression sich ändernden Mittelwert, aus dem Aufschluß über die Ringbewegung erhalten wird. Mit diesen Sonden ergaben sich experimentelle Schwierigkeiten bei der Teilchenzahlermittlung im Übergang des Elektronenringes von der relativ langsamen Herausroll-Phase in die Beschleunigungsstrecke.

Es wurde daher eine lange Magnetfeldsonde, die helikal um die Spulenachse gewunden ist / 203 / und IPP 0/32 (Abb. 1), entwickelt.

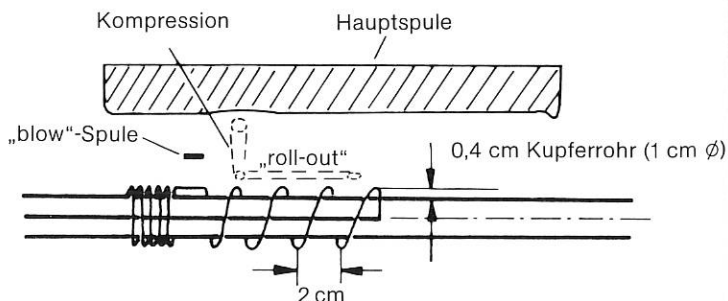


Abb. 1: Schema der Magnetfeldsonde mit helikaler Wicklung

*) U. Schumacher, C. Andelfinger, M. Ulrich, Phys. Lett. 51A, 367 (1975)

Die Sonde ist um ein auf der Achse liegendes Kupferrohr gewunden; zur Kompensation der vom Kompressionsmagnetfeld induzierten Spannung ist außerhalb des Bereiches, den der Elektronenring überstreicht, eine Spule mit umgekehrtem Windungssinn in Serie geschaltet. Das gemessene Signal hängt direkt von der Teilchenzahl im Ring ab und ist nur linear vom reziproken Ringradius, nicht dagegen von der axialen Ringlage sowie der axialen Ringausdehnung abhängig. Abb. 2 gibt ein Beispiel des Sondensignals wieder, wobei die obere Linie dem Oszillogramm eines Elektronenringes mit der Kompression, dem Herausrollen („roll-out“) und dem Überlaufen („spill-out“) in die Beschleunigungsstrecke entspricht; die untere Linie ist für denselben Vorgang, jedoch ohne Elektronen erhalten. Die Linien beginnen zum Zeitpunkt des Elektroneneinschusses auseinanderzulaufen (kurz nach dem Start des Magnetfelds), und der Abstand nimmt entsprechend der Stromzunahme bei der Kompression zu.

Im zweiten Teil der Kompressionsphase, in dem der Endradius fast erreicht ist, und im roll-out bedeutet der konstante Linienabstand auch Konstanz der Elektronenzahl im Ring. Die Linientrennung verschwindet abrupt, sobald der Ring axial (d. h. von der Sonde weg) beschleunigt wird.

Als experimentelles Ergebnis wurde festgestellt, daß sich unter günstigen Parametern die Teilchenzahl (im Gegensatz zu vorherigen Vermutungen) durch alle verschiedenen Stufen des Experiments, d. h. vom Zeitpunkt kurz nach Ende der Ringbildung bis zum Ende der Beschleunigung, nicht ändert. Ihr Maximum von derzeit $N_e = 3 \cdot 10^{12}$ wird durch die Eigenschaften des injizierten Elektronenstrahls und die Ringbildung bestimmt. Es ergab sich aus anderen Magnetfeldsondenmessungen weiterhin / 203 / und IPP 0/32, daß die Elektronen nicht über den Überlaufpunkt ausfließen, sondern als Ringeinheit ohne Teilchenverluste in die Beschleunigungsstrecke gelangen.

Der Messung des kleinen Ringquerschnitts galt besondere Aufmerksamkeit, wobei die verschiedenen dazu verwendeten Diagnostikmethoden (Abstreifertechnik, Profilmessungen aus der Synchrotronstrahlung, Magnetfeldmessungen, Anregung von Ringschwingungen mit Messung der Synchrotronemission usw.) nicht die erhoffte Meßgenauigkeit zuließen. Im komprimierten Zustand ergab sich eine axiale Dichteverteilung, wie sie in Abb. 3 wiedergegeben wird.

Das gemessene Ringprofil ist etwa um einen Faktor 1,5 breiter als das aus den Anfangsbedingungen erwartete. Das Profil ist deshalb so breit, weil zur Unterdrückung der longitudinalen Instabilität (wie sie auch am „uncompressor“ gemessen wurde*) eine Energieverbreiterungsfolie verwendet werden mußte, die die Strahlemittanz notwendigerweise erhöht. Die Verbreiterung gegenüber dem erwarteten Wert ist noch nicht geklärt. Es wurde gefunden / 203 /, daß die axiale Ringbreite beim Übergang zur Beschleunigungsstrecke nicht weiter zunahm. Die Haltefeldstärke konnte durch alle Maßnahmen nur geringfügig auf etwa 5 MV/m erhöht werden.

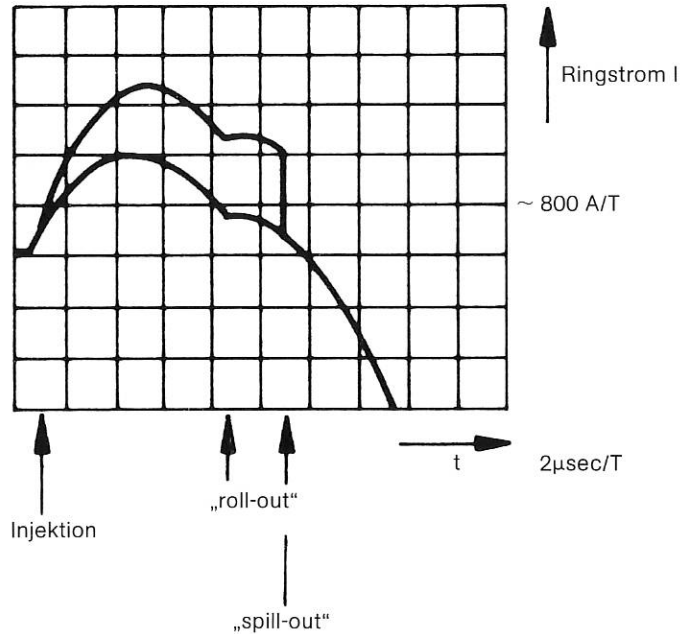


Abb. 2: Oszillogramm der helikalen Spule

Gegen Ende des Berichtsjahres wurde versucht, herauszufinden, ob die radiale Ringausdehnung durch Betatronamplituden oder durch große Energiebreite der Elektronen (als Folge einer longitudinalen Instabilität) bestimmt ist. Dazu bietet sich die Streuung von Laserlicht an den Elektronenringen an, da die Streuung im wesentlichen in einen engen Raumwinkel um die Elektronengeschwindigkeit erfolgt. Unter den vorliegenden Bedingungen ($\gamma = 27$) im komprimierten Zustand ist der Öffnungswinkel etwa 2° . Die Messung der Winkelverteilung der Streustrahlung erlaubt die Bestimmung der durch die Betatronschwingungen verursachten Winkelverteilungen (und damit der Betatronamplituden) der Elektronen. Die Bestimmung des Spektrums der Streustrahlung erlaubt die Messung der Elektronenenergieverteilung, da die Frequenz des (scharfen) Maximums der Streustrahlung quadratisch

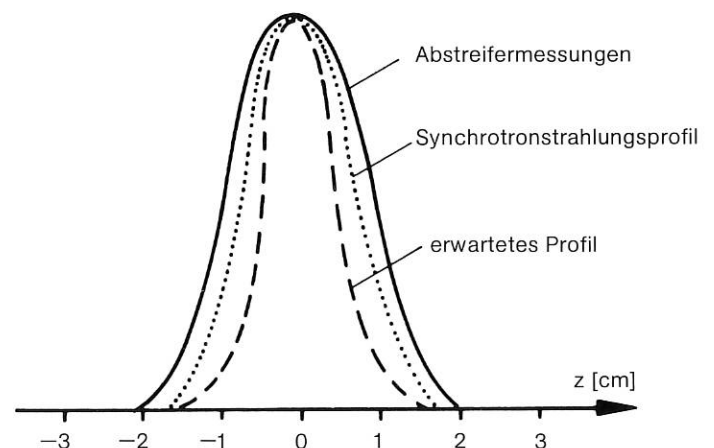


Abb. 3: Die axiale Dichteverteilung im komprimierten Zustand

*) W. Herrmann, J. Fink, IPP 0/34 in Vorbereitung

von γ abhängt. Es liegt im Bereich von einigen keV Energie. Bisher konnte jedoch wegen des großen Untergrundes von Röntgenstrahlung beim Elektroneneinschuß ein Laser-Streusignal noch nicht festgestellt werden.

2. Elektronenring-Beschleuniger-Experiment PUSTAREX

A. Konzept von PUSTAREX

PUSTAREX ist im Jahresbericht 1975 und in / 195 /, / 197 / und IPP 0/30 beschrieben. Das Konzept von PUSTAREX wurde in zwei Punkten geändert:

1. Die Ringbildung ist jetzt im rein statischen Feld vorgesehen. Das erforderte die Berechnung einer dritten statischen Spule (Abb. 4). Die gepulsten Spulen mußten nicht geändert werden.
2. Das Stromprogramm für die gepulsten Spulen 7 und 8 (siehe Abb. 4) wurde so geändert, daß eine „Durchkompression“ des Ringes ohne langen Aufenthalt im „Wartesaal“ möglich wird. Eine schematische Darstellung des Aufbaus gibt Abb. 4.

B. Rechnungen zu PUSTAREX

1. Die Kräfte auf die gepulsten Spulen durch das Eigenfeld, die Felder der gepulsten und der statischen Spulen und die Kräfte auf die Dosen wurden berechnet, auch für den Fall von Fehlschaltungen und Fehlzündungen. In einigen Fällen wurde daraufhin die Halterung der gepulsten Spulen geändert.
2. Die benötigte Stärke der Bleche, die die statischen Spulen gegen die gepulsten Felder abschirmen,

wurde berechnet. Die Dicke der Bleche ist nach oben begrenzt durch die Forderung, daß das Feld der statischen Spule (langsam gepulst) in 1 s mit einer Abweichung von höchstens 10^{-4} vom Wert des Feldes die Abschirmung durchdringt. Für eine Modellspule wurde die Feldabweichung bei einer Schirmung mit verschiedenen dicken Cu-Mänteln als Funktion der Zeit bei sinusförmigem Stromanstieg mit $T/4 = 1/2$ s berechnet. Ein Cu-Blech mit 5 mm Dicke erfüllt die Bedingungen.

3. Die Oberflächenströme auf der Einschubsschnauze zur Kompensation der Feldstörungen wurden berechnet, siehe Abb. 5.
4. Inflektionsrechnungen wurden begonnen; sie sollen die Lage, die Geometrie und den Feldverlauf des Inflektors für optimale Inflektion ergeben.

C. Aufbau von PUSTAREX

Der Aufbau von PUSTAREX geht in etwa planmäßig voran. Anfang 1977 kann mit dem Einschub in das statische Feld und mit Versuchen zur Ringbildung begonnen werden. Der Stand der größeren Komponenten ist folgender:

1. Die statischen Spulen 1 und 2 wurden mit höchster Präzision gefertigt. Die Präzision war vor allem erforderlich, weil eine nachträgliche Justierung der Feldkomponenten mit der erforderlichen Genauigkeit von 10^{-4} vom Hauptfeld schwierig wäre. Auch die statische Spule 3 ist – mit geringeren Anforderungen – fertiggestellt.
2. Die gepulsten Spulen und ihre Halterungen sind im wesentlichen gefertigt. Ein Dauerversuch der ersten drei Spulen unter Vollast führte zu konstruktiven Verbesserungen. Funkenstrecken wurden entwickelt, die bei der zu erwartenden Rückspannung von einigen kV nicht durchzünden.

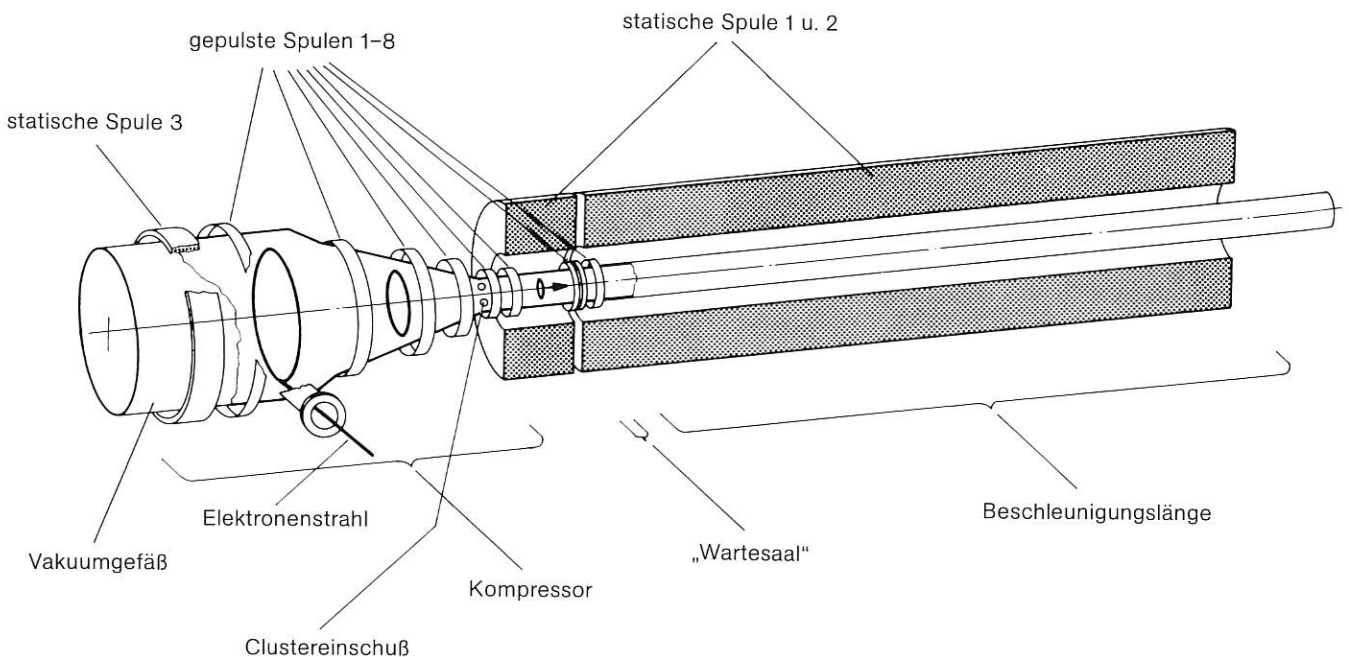


Abb. 4: Schematische Skizze des Experiments PUSTAREX: Aufbau der statischen und der gepulsten Spulen – ohne die Schirmbleche zwischen den gepulsten und den statischen Spulen

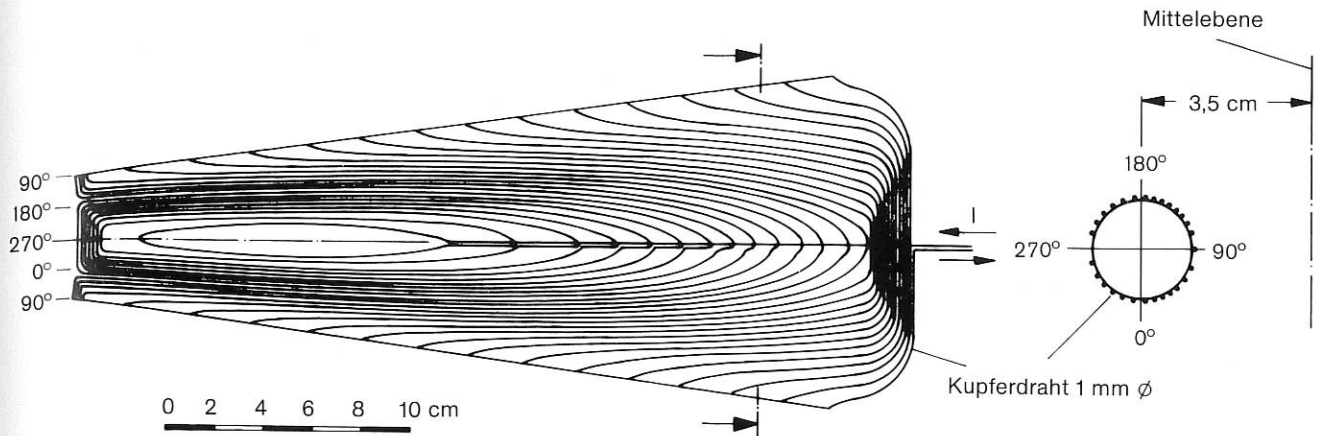


Abb. 5: Abwicklung der Stromverteilung auf der konischen Eisenschauze zur Kompensation der Störung, die durch das Eisen verursacht wird

3. Vakuumgefäße aus Glas sind geliefert. Für die Anfangsphase der Messungen mit niederen Anforderungen an den Druck wurde im Hause ein glasfaserverstärktes Epoxygefäß auf Kaptonfolie hergestellt.
4. Das Strahlführungsrohr mit Linse und Ablenkkfeldern ist aufgebaut und mit der Elektronenkanone verbunden.

D. Messungen

1. Feldanstieg auf der Achse der statischen Spulen 1 und 2: Bei einer Überspannung von 28% ist die Feldabweichung vom konstanten Endwert ca. 400 ms nach dem Einschalten kleiner als $3 \cdot 10^{-4}$ (Meßgrenze) und entspricht somit der Modellrechnung (B2). Die mittlere Induktivität ergibt sich dabei zu $L = 93$ mHy. Die „statische“ Induktivität liegt bei 120 mHy. Die Abweichungen von der statischen Induktivität sind ein Maß für die Anwendbarkeit der Gleichstromrechnungen. Bei Stromanstiegen, die Frequenzen $\lesssim 1$ Hz entsprechen, werden die Feldabweichungen – wie gemessen – klein sein.
2. Schnauzenkompensation: In einem Vorexperiment wurde gezeigt, daß mit dem berechneten Oberflächenstromverlauf (B3) auf der Einschußschnauze die Kompensation der Feldstörungen bis auf $\pm 0,25\%$ möglich war / 197 / *).
3. Inflektion: Mit einem radialen Inflektionsfeld wurden in einem Vorexperiment bis zu $8 \cdot 10^{12}$ Elektronen axial inflektiert. Bei geringerer Strahlemittanz könnte diese Zahl erhöht werden / 197 / *).
4. Negativ Mass Instabilität: In einem Vorexperiment wurde gezeigt, daß die negative mass Instabilität innerhalb weniger Umläufe zu Strahlaufweitung und Verlusten führt. Die im Ring verbleibende Teilchenzahl war daher $N_e \lesssim 4 \cdot 10^{12}$ Elektronen. Eine Unterdrückung der Instabilität durch Landaudämpfung erwies sich als schwierig, da eine Energie-streuung der Elektronen über Folien im Strahlengang gleichzeitig zu großen Emittanzaufweitungen führte / 197 / *).

3. Theoretische Arbeiten

1. Dynamik von Elektronen-Ionenringen

Für das Experiment PUSTAREX wurden Parameterstudien zur Optimierung der axialen Inflektion der Elektronen in den Kompressor durchgeführt. Die Rechnungen zeigen, daß 1 bis 3 Elektronenumläufe effizient inflektiert werden können und zu einem Ring mit einem kleinen Ringradius von $r = 1.7$ cm vor der Kompression führen.

Zum Studium der $Q_r = 1$ Resonanz wurde das Spektrum von radialen Eigenschwingungen eines relativistischen Elektronenrings berechnet. Es ergab sich ein diskretes Spektrum (kollektive Moden) und ein kontinuierliches, das den vom Plasma her bekannten van Kampen Moden entspricht. Es kann z.B. durch eine Unsymmetrie der Führungsfelder resonant angeregt werden, wenn die Betatronfrequenz gegen Ende der Kompression während der Ionen-Beladung den Wert $Q_r = 1$ kreuzt. Diese Resonanz führt zu einer Aufweitung der kleinen Ringdimensionen und ist daher zu vermeiden.

Die im Rahmen der Zusammenarbeit mit der ERA-Gruppe an der Universität von Maryland, USA, durchgeführten Untersuchungen zum Einfluß resistiver Wände auf die axiale Bewegung von Elektronenringen wurden erweitert auf die Bremsung eines axial sehr elongierten Elektronenringes (Hohlzylinder), der sich zwischen einem resistiven und einem gut leitenden Zylinder bewegt. Es zeigt sich, daß sowohl die axiale Ausdehnung der Ringe als auch der zusätzliche leitende Zylinder die zur Ionenbeladung notwendige Abbremsung des Elektronenringes je nach Geometrie stark reduzieren.

2. Stabilität von Elektronen-Ionenringen

Im Vordergrund der Stabilitätsuntersuchungen standen der Einfluß von Randbedingungen für die Felder auf die Stabilität, die Kopplung von Moden und nicht-lineare Effekte.

Zur axialen Fokussierung der Elektronenringe werden mit Erfolg koaxiale, in Längsrichtung geschlitzte leitende Hohlzylinder (squirrel cage) verwendet. Zur

*) W. Herrmann, J. Fink, IPP 0/34 in Vorbereitung

Unterdrückung der negative mass Instabilität sind gut leitende koaxiale Zylinder in Ringnähe günstig (kleine Kopplungsimpedanz). Von Interesse ist daher der Einfluß der Längsschlitz auf die Kopplungsimpedanz. Erste Rechnungen in linearer Geometrie, bei denen die Längsschlitz durch anisotrope Leitfähigkeit des Zylinders simuliert werden, ergaben, daß der Betrag der Kopplungsimpedanz im allgemeinen vergrößert wird.

In den bisherigen Arbeiten zur Ringstabilität wurden transversale und azimutale Instabilitäten in Näherungen betrachtet, in denen sie entkoppelt auftraten. genauere Analyse und Berücksichtigung des Zentrifugalkraftterms in den Bewegungsgleichungen zeigte jedoch, daß eine Kopplung zwischen radialen und azimutalen Moden besteht. Die Auswertung der hierzu abgeleiteten Dispersionsrelation ist noch im Gange.

Für die Elektronen-Ionen-Instabilität wurde der Einfluß nichtlinearer Effekte auf die Stabilität untersucht, die durch den nichtlinearen Charakter der Polarisationskräfte zwischen Elektronen- und Ionenzahl bedingt sind.

Im linearen Bereich der Instabilität reicht die Landaudämpfung zur Stabilisierung meist nicht aus, da die kollektive Mode mit einer gegenüber den Einzelteilenschwingungen verschobenen Phasengeschwindigkeit auftritt und damit Phasemischung erschwert wird. Daher ist die Untersuchung nichtlinearer Amplitudenbegrenzung wichtig. Die Amplitudenbegrenzung der Dipolmode wurde für eine spezielle nichtlineare Kopplung zwischen Elektronen und Ionen untersucht. Außerdem wurden Momentengleichungen hergeleitet, deren Lösungen als asymptotische Reihen angesetzt werden (Methode von *Bogoliubov-Mitropolsky*). Darüberhinaus wurde ein numerisches Modell entwickelt, bei welchem die transversale Verteilung von Elektronen und Ionen durch Superpartikeln mit elektrostatischer Wechselwirkung simuliert wird. Nichtlineare Stabilisierung entsteht durch Störung der Resonanzbedingung zwischen Elektronen und Ionen bei endlicher Amplitude und durch Phasemischung.

Bereich **Technologie**

(Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter)

Im Herbst 1976 konnte im Stellarator WENDELSTEIN II B das erste Wasserstoffplasma durch intensive Laserbestrahlung eines freifallenden Pellets erzeugt werden. Bisherige Messungen deuten darauf hin, daß die Lebensdauer des Laserplasmas im Stellaratorfeld die toroidale Driftzeit um mehrere Größenordnungen übertrifft. Eine neue, Mitte des Jahres eingeleitete Arbeitsrichtung gilt der Dichteerhöhung von Plasmen durch Pelletablation. Hierzu wurden Experimente am PULSATOR aufgenommen.

Die wissenschaftliche und technische Vorbereitung von Injektionsexperimenten an W VII A und ASDEX sowie deren Durchführung wurde dem im Mai 1976 eingesetzten Projekt „Neutralinjektion“ übertragen. Kennzeichnend für den bisherigen Verlauf der Arbeiten sind die Inbetriebnahme, des Vorionisierungsinjektors an W VII A, die Erstellung neuer Rechenprogramme zur wissenschaftlichen Vorbereitung der Heizexperimente mit dieser Maschine und umfangreiche numerische Rechnungen, beispielsweise zur Definition der ASDEX-Injektionsparameter. Technisch vorbereitet wurden die geplanten Experimente durch den Auftrag zur Entwicklung und Lieferung von vier Injektoren, durch die Bestellung einer zentralen Hochspannungsversorgung und die Definition der Strahlführungssysteme sowie den Beginn ihrer Konstruktion.

Auf dem Gebiet der Supraleitungstechnologie wurde eine Zusammenarbeit mit der US-ERDA (Large Coil Project) im Rahmen des IPP/GfK-Programmes „Magnete für die Fusion“ vorbereitet. Die Arbeiten zur Technologie supraleitender Torusmagnete wurden in Karlsruhe fortgesetzt. Der letzte experimentelle Beitrag des IPP hierzu war die Untersuchung des supraleitenden W VII Prototyp-Magneten, die im Dezember abgeschlossen wurde.

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Systemstudien galten vorwiegend der mathematischen Modellierung von Fusionskraftwerken. Unter den weiteren reaktororientierten Arbeiten verdient die über stationäre diffusive Gleichgewichte besondere Aufmerksamkeit.

Im Juni 1976 fand in Garmisch-Partenkirchen, ausgerichtet vom Bereich Technologie, das „9th Symposium on Fusion Technology“ statt. In 126 Vorträgen erhielten die mehr als 250 Teilnehmer aus 16 Ländern einen Überblick über den Stand des Wissens und die wichtigsten Fusionsprogramme / 227 /.

1. Neutralinjektion

(E. Speth, J. Bäuml, J. H. Feist, K. Freudenberger, J. Kolos, H. Lohnert, W. Melkus¹⁾, W. Ott, F. Probst, A. Stähler, O. Vollmer, G. Wulff)

1.1 Einleitung und Übersicht

Gemäß dem Auftrag der Wissenschaftlichen Leitung des IPP wurde ein Vorschlag über das Vorgehen auf dem Gebiet der Neutralinjektion erarbeitet. Dieser Projektvorschlag wurde am 31. März 1976 der WL vorgelegt und im Rahmen eines Institutskolloquiums diskutiert. Die WL stimmte dem Vorschlag zu und beschloß am 13. Mai die Einsetzung eines Projekts „Neutralinjektion“ im Bereich Technologie. Als Aufgabe des Projekts wurde festgelegt, die Injektionsexperimente an W VII A und ASDEX in wissenschaftlicher und technischer Hinsicht vorzubereiten und zusammen mit den Projekten W VII A und ASDEX durchzuführen. Die wesentlichen Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitsgebieten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der „Vorionisierungsinjektor“ an W VII A wurde im Sommer in Betrieb genommen. Bisher wurden ca. $\frac{3}{4}$ der am Teststand ermittelten maximalen Leistung erreicht. Am Toruseintritt wurde kalorimetrisch eine Neutrallleistung von 30 kW in eine effektive Öffnung von 8 cm \varnothing gemessen.

Die wissenschaftlichen Vorbereitungen zum geplanten W VII A-Heizexperiment wurden durch Erstellung neuer Rechenprogramme wesentlich vorangetrieben. Hervorgehoben sei die selbstkonsistente Berechnung des Heizeffekts am W VII A-Plasma durch Kopplung eines Programms, in dem das Heizleistungsprofil berechnet wird, an den Düchs-Code. Vorläufige Ergebnisse deuten darauf hin, daß $\beta_{pol} = 8$ erreicht werden könnte durch gleichzeitigen Gaseinlaß und Hochleistungsinjektion.

Die wesentlichen Fortschritte bei der technischen Vorbereitung des geplanten Experiments waren durch den Auftrag für Fertigung von vier Injektoren in Culham, die Bestellung einer zentralen Hochspannungsversorgung bei der Industrie und durch die Definition der Strahlführungssysteme und den Beginn ihrer Konstruktion gekennzeichnet.

Zur Vorbereitung der Injektion in ASDEX wurden umfangreiche numerische Rechnungen durchgeführt, die zunächst die Möglichkeit der Nachfüllung durch Injektion von Atomen, Molekülen, Clustern zum Gegenstand hatten. In der zweiten Jahreshälfte konzentrierten sich die Arbeiten mehr auf die Heizung durch Atominjektion, insbesondere auf die Fragen der an das Plasma übertragenen Heizleistung, des effektiv zugeführten Teilchenstroms und der induzierten Verunreinigungen. Die Ergebnisse, die gleichzeitig zu einer Definition der Injektionsparameter führten, zeigen, daß mit vier Injektoren zu je 40 A und 40–50 kV etwa 2.5 MW in das ASDEX-Plasma eingekoppelt werden können, womit eine bescheidene Nachfüllung und ein geringfügiger Zuwachs von Z_{eff} verbunden ist.

1.2 Vorionisierungsinjektor

Die Tests des Injektors am Teststand wurden weitergeführt; durch Verwendung von Molybdänelektroden konnte die Pulslänge auf 0.5 sec bei 200 kW extrahierter Leistung ausgedehnt werden.

Die im letzten Jahre begonnene Installation der Anlage am W VII A wurde abgeschlossen und der Injektor im August in Betrieb genommen. Bisher wurden 150 kW extrahierte Leistung erreicht, d. h. $\frac{3}{4}$ des maximal möglichen, am Teststand ermittelten Wertes. Die kalorimetrisch gemessene Neutrallleistung am Toruseintritt von 30 kW in eine effektive Öffnung von 8 cm \varnothing entspricht den Erwartungen aufgrund von Divergenz und Neutralisation.

Rechnungen zum Plasmaaufbau durch Neutralinjektion wurden mit Hilfe eines Programms weiterentwickelt. Vorläufige Ergebnisse zeigen, daß die Elektronentemperatur als wesentlicher Parameter das Einsetzen einer „Exponentiation“ bestimmt ($T_e > 2$ eV). Bei Temperaturen unter 2 eV bleibt der Plasmaaufbau bei einer Dichte von einigen Prozent der Neutrallgasdichte hängen (Bohm-Diffusion angenommen). Im weiteren Ausbau des Programms soll die Elektronentemperatur, die bisher als Parameter eingegeben wurde, selbstkonsistent berechnet werden.

1.3 W VII A-Heizung

1.3.1 Rechnungen zur Strahl-Plasma-Wechselwirkung

Im Rahmen der physikalischen Vorbereitung der Neutralteilchenheizung am WENDELSTEIN VII A wurden u. a. folgende Arbeiten durchgeführt:

- Rechnungen zum Kaltgaseinlaß zur Erreichung hoher Dichten;
- Selbstkonsistente Rechnungen zur Untersuchung des Effektes der Heizung auf das Plasma;
- Abschätzung des Verunreinigungszustroms aufgrund der Neutralinjektion.

Bei allen Rechnungen wurde zunächst der Fall eines Tokamak-Plasmas mit $B_t = 35$ kA und $J_{\varphi} = 50$ kA, Plasmaradius $a = 13$ cm, untersucht.

Für eine effektive Heizung ist aufgrund der Einschubbedingungen (nahezu senkrechter Einschub, kleiner Plasmadurchmesser) eine hohe Plasmadichte notwendig. Rechnungen mit dem Düchs-Code haben gezeigt, daß man ähnlich wie beim PULSATOR durch Kaltgaszufuhr die Dichte wesentlich steigern kann. Innerhalb von 80 msec sollten mittlere Dichten von $1.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ zu erreichen sein, ausreichend, um mehr als 70% der Neutrallleistung eines 30-keV-Strahls zu absorbieren.

Das Leistungsdichteprofil der Heizung wird stark bestimmt durch die Form der Driftbahnen, die die auf der Außenseite des Plasmas entstandenen Ionen nicht in das Plasmaintere gelangen läßt. Dadurch erhält man über weite Bereiche des Plasmas annähernd konstante Heizleistungsdichte und kein ausgeprägtes Maximum im Inneren wie bei tangentialer Injektion.

¹⁾ Zentrale Technische Einrichtungen des IPP

Ein Programm, welches aus vorgegebenem Dichte- und Temperaturprofil die Leistungsverteilung auf Ionen und Elektronen berechnet, wurde an den Düchs-Code angekoppelt (zunächst ohne Abbremsungseffekte). Ein vorläufiges Ergebnis einer solchen Rechnung für β_p (mit und ohne Neutralinjektion) zeigte, daß eine Steigerung von 2.5 auf Werte von mehr als 8 möglich ist.

Die Neutralinjektion ist aufgrund der verschiedensten Prozesse mit einem Fluß von schnellen Teilchen auf die Wand verbunden, die durch sputtering zu einem Anstieg der Verunreinigungen führen können. Rechnungen hierzu haben ergeben, daß in dem angestrebten Hochdichteplasma durch die Verdünnung der Verunreinigungen nur ein kleiner Anstieg in Zeff (z. B. von 2.0 auf 2.4) zu erwarten ist.

1.3.2 Technische Vorbereitungen

Vier **Wasserstoff-Ionenquellen** für 30 kV und je 30 A und eine Pulsdauer von 0.2 sec wurden in Culham bestellt. Die Strahlqualität soll so beschaffen sein, daß $\frac{2}{3}$ des erzeugten Neutralstrahls durch die engen Stützen des W VII A-Torus (8 cm ϕ effektive Öffnung) fokussiert werden können. Die Quellen sollen im Laufe des Jahres 1977 geliefert und getestet werden, so daß sie 1978 am W VII A installiert werden können. Test der Quellen am Teststand, Anbau am W VII A und Inbetriebnahme an der Maschine sollen unter der Verantwortung von Culham erfolgen. Zur Vorbereitung des Tests der 1. Quelle am Teststand in der Hochspannungshalle wurde der Aufbau einer Kondensatorbatterie (500 k Joule, 50 kV) und die Entwicklung einer Hochspannungsregelung begonnen.

Hochspannungsanlage (R. C. Kunze). Kurz vor Jahresende wurde eine zentrale Hochspannungsanlage bei der Industrie bestellt, bestehend aus acht Einheiten zu je 35 kV, 40 A (umschaltbar 70 kV, 20 A), 10 sec. Die Einheiten können wahlweise einzeln oder auch paarweise hintereinander oder parallel geschaltet betrieben werden (ASDEX-Injektion). Die Anlage soll von drei Orten aus angesteuert werden können: W VII A, Teststand im I-Gebäude und ASDEX.

Strahlführungssysteme. Ein weiterer Punkt der technischen Vorbereitung des Experiments waren Überlegungen zum Vakuumsystem und der damit verbundenen Geometrie der Vakuumkammern. Aufgrund der engen Einschußöffnungen muß man mit den Quellen möglichst nahe an den Torus. Dies bedingt kurze Neutralisationsstrecke und wenig Platz für Pumpen. Da eine Optimierung der Geometrie von einer Reihe von Parametern abhängt und auch bei künftigen Experimenten wieder auftaucht, wurde ein Programm geschrieben, welches eine einfache Variation aller relevanten Parameter und ihre Auswirkung auf Druckverteilung, Gasflußverteilung und mögliche Neutralteilchenleistung gestattet. Als Beispiel ist in Abb. 1 die maximale Neutralleistung, die zugehörige optimale Länge der Beam-line und die anfallende Gasmenge als Funktion des Quelldrucks aufgetragen. Aus Gründen der Gasbelastung wurde eine Länge von 150 cm gewählt. Die Konstruktion des Strahlführungssystems wurde begonnen. Als Pumpsysteme stehen derzeit Titan-Verdampferpumpen oder Volumen-Getterpumpen zur Diskussion. Eine Entscheidung, welches System verwendet werden soll, ist im Frühjahr 1977 zu erwarten, wenn eigene Versuche zu den Titan-Verdampfern und ein Entwicklungsauftrag der Fa. SAES zu den Volumengettern abgeschlossen sind.

1.4 Injektion an ASDEX

1.4.1 Heizung durch Atominjektion

Neutral-Injektion am Tokamak ASDEX ist in erster Linie als zusätzliche Heizmethode vorgesehen, mit der folgende Ziele angestrebt werden sollen:

- Untersuchung des stoßfreien Gebiets für die Ionen auch bei höheren Plasmadichten;
- Erhöhung der erreichbaren Plasmadichte;
- Untersuchung der Möglichkeit, Temperatur- und Stromprofile gezielt zu beeinflussen.

Die ersten beiden Punkte erfordern eine an das Plasma übertragene Leistung, die deutlich über der zu erwartenden Ohmschen Heizleistung ($P_{OH} \lesssim 1$ MW) liegt. Der dritte Punkt verlangt nach einer kontrollierbaren Veränderung des Profils der deponierten Leistung.

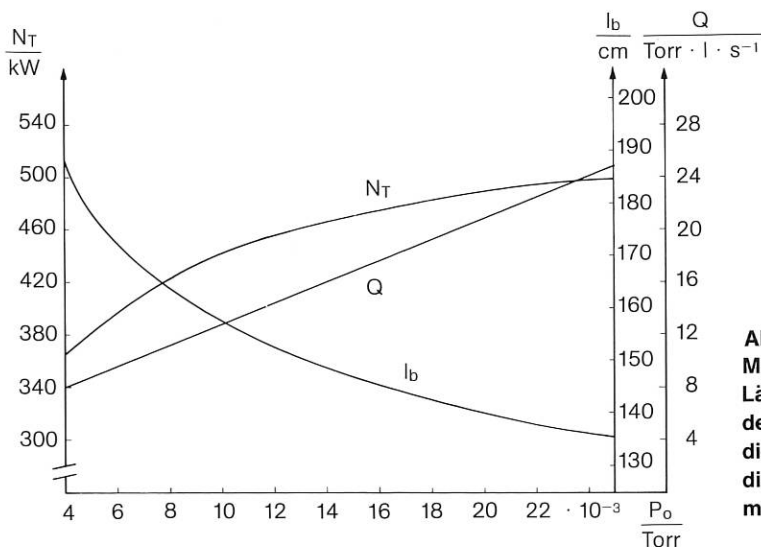


Abb. 1: Maximale Neutralleistung N_T , optimale Beamline-Länge l_b und zugehöriger Gasfluß Q als Funktion des Quelldrucks. Mit der Länge verändert sich die Neutralisationsstrecke, mit dem Quelldruck die Strahlzusammensetzung. Alle anderen Parameter sind festgehalten.

Zur Vorbereitung des Injektionsexperimentes an ASDEX wurden Rechnungen durchgeführt, die unter Zugrundelegung der angeführten Ziele die anzustrebenden Parameter der Injektoren festlegen sollten. Die Rechnungen umfaßten sowohl die Strahlabsorption als auch die Abbremsung der schnellen Ionen durch Energieübertragung an das Plasma. Nahezu vollständige Absorption und eine Teilchen- und Leistungsdeposition mit Maximum im Plasmazentrum erhält man, wenn die mittlere freie Weglänge gegenüber Absorption vergleichbar mit dem Plasmaradius ist ($0.5 \lesssim a/\lambda_0 \lesssim 2.0$; λ_0 : Absorptionslänge bei der Spitzendichte $n_e(0)$). Ladungsaustausch zwischen den schnellen Ionen und dem Neutralgasuntergrund während des Abbremsens kann zu beträchtlichen Verlusten von schnellen Ionen und damit zu einer Reduzierung der an das Plasma übertragenen Leistung führen. Um diesen Effekt klein zu halten, müssen die injizierten Atome möglichst in der Plasmamitte absorbiert werden. Die Verluste durch Streuung der schnellen Teilchen auf nicht konfinierte Bahnen dürften dagegen gering sein (Leistungsverluste $< 5\%$). Dies liegt insbesondere am relativ hohen Plasmastrom, der bei ASDEX angestrebt wird ($I_p = 500$ kA).

Mit der Injektion schneller Atome ist immer ein Verunreinigungsanstieg im Plasma verbunden. Teilchen, die nicht absorbiert werden, Plasmaneutrale, die durch Ladungsaustausch bei der Absorption gebildet werden, schnelle Neutrale, die durch Umladung während des Abbremsens entstehen und Ionen, die auf nicht konfinierte Bahnen gestreut werden, rufen durch Sputtering an den Wänden einen Zufluß schwerer Atome in das Plasma hervor. Der dadurch verursachte Anstieg von Z_{eff} wird geringer mit ansteigender Teilchenenergie, bevorzugter Teilchendeponierung in der Plasmamitte und höherer Plasmadichte.

Die Berücksichtigung all dieser Gesichtspunkte führte zu den folgenden Parametern, die für die vier geplanten ASDEX-Injektoren (Einschußrichtung tangential zum Hauptfeld) angestrebt werden sollen:

Beschleunigungsspannung:	40–50 kV
Extrahierter Strom (elektr.):	40 A je Quelle
Pulslänge:	0.2–1.0 sec

Strahlzusammensetzung, Neutralisierungsgrad, Geometrie und Reionisierungsverluste lassen erwarten, daß etwa 40–50% der extrahierten Leistung in den Torus gelangen. Weitere 10–15% werden nicht im Plasma absorbiert oder gehen während der Abbremsung verloren. Die erreichbare Heizleistung von ungefähr 2.5 MW liegt also deutlich über der Ohmschen Heizleistung. Der Anstieg von Z_{eff} sollte, abhängig von der Dichte, $\Delta Z_{\text{eff}} \lesssim 1$ sein. Für die Wahl der Beschleunigungsspannung war hauptsächlich ausschlaggebend, daß bei niedrigeren Teilchenenergien ein stärkerer Anstieg der Verunreinigungen und ein ungünstigeres Teilchen-Depositionsprofil zu erwarten ist. Höhere Spannungen führen (neben den technologischen Problemen) zu einer unvollständigen Absorption bei niedrigeren Dichten.

In Abb. 2 ist als Beispiel die im Plasma absorbierte Leistung P_{Pl} , der im Plasma absorbierte und thermalisierte Teilchenstrom I_{lab} sowie der zu erwartende Verunreinigungsanstieg ΔZ_{eff} als Funktion der Beschleunigungsspannung aufgetragen. Dabei ist der Strom aus den Quellen festgehalten: $I = 4 \cdot 40$ A (elektrisch). Die Rechnungen berücksichtigen alle drei Energiekomponenten des Teilchenstrahls, die Verluste im Strahlführungssystem und die oben zusammengestellten Verluste im Plasma. Sie setzen als wesentliche Plasmaparameter voraus: $n_e(0) = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $T_e(0) = 1.5$ keV und $Z_{\text{eff}} = 2$.

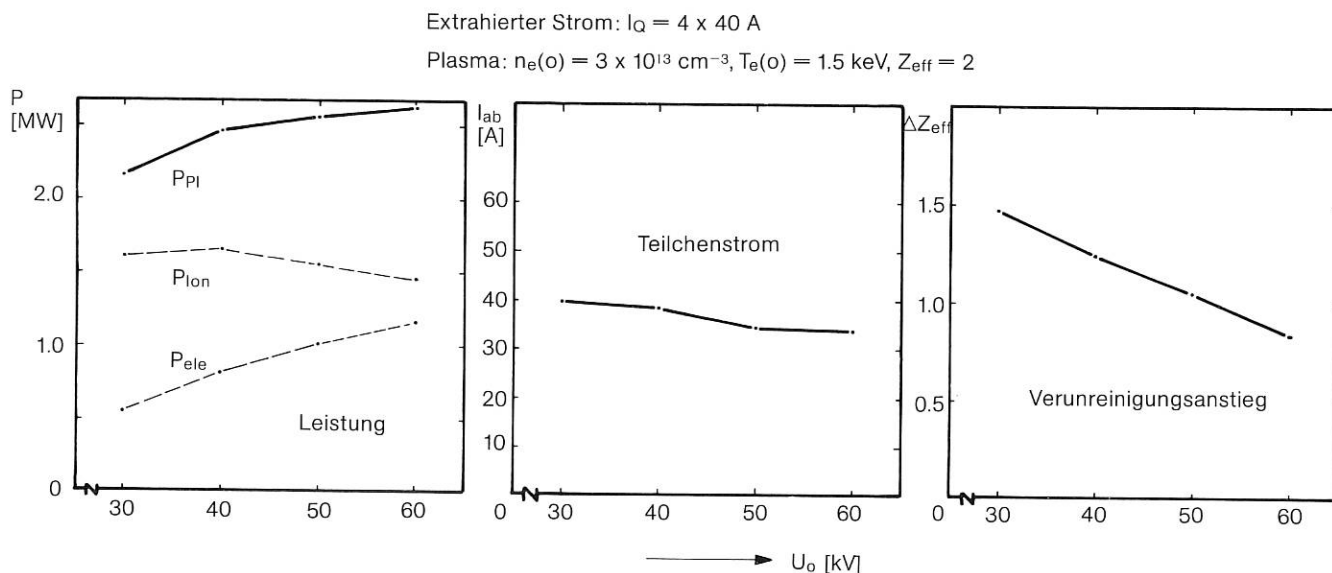


Abb. 2: Leistungs-, Teilchen- und Verunreinigungsbilanz für Neutral-Injektion in ASDEX. P_{Pl} : im Plasma absorbierte Leistung, P_{Ion} : Leistung an Ionen, P_{ele} : Leistung an Elektronen, I_{lab} : Teilchenstrom in Plasma, ΔZ_{eff} : Verunreinigungsanstieg.

Eine wirksame Änderung von Depositionsprofilen zur Beeinflussung von Plasma-Profilen ist nur durch Schwenken der Injektoren zu erreichen. Eine bevorzugte Deponierung am Plasmarand ist aber mit der Gefahr stark erhöhter Plasma-Wand-Wechselwirkung verbunden.

Für die oben angegebenen Injektionsparameter liegt der Teilchenstrom, der im Plasma absorbiert und thermalisiert wird, bei etwa 35 A. Der Beitrag der Neutralinjektion zur Nachfüllung beim Divertor-Experiment ASDEX ist somit gering.

1.4.2 Nachfüllung durch Clusterinjektion

(G. Haas, M. Keilhacker)

Es ist geplant, den Cluster-Injektor, der sich im IKVT Karlsruhe in der Entwicklung befindet, am Experiment ASDEX einzusetzen. Da dessen maximale Leistung von 100 kW zur zusätzlichen Heizung zu gering ist, wird der Schwerpunkt dieser Injektion auf der Teilchennachfüllung liegen.

Zur Vorbereitung des Experiments wurden Rechnungen zum Eindringvermögen von H₂-Clustern und H₂-Molekülen in ein Plasma durchgeführt. Wichtigstes Ergebnis dieser Untersuchungen war, daß die Cluster vor Eintritt in das Plasma in sehr kleine Fragmente oder möglichst in Moleküle zerlegt werden müssen, um eine ausreichende Eindringtiefe zu gewährleisten. Moleküle mit Energien, die etwa der Plasmatemperatur entsprechen, haben auch im Vergleich zu Atomen derselben Energie eine größere freie Weglänge gegenüber Absorption, und der Anteil, der durch Umladung absorbiert wird, ist geringer. Die Zerlegung eines Clusterstrahls in einen Strahl von Molekülen mit Plasmaenergie scheint für Experimente von ASDEX-Dimensionen eine geeignete Methode zu sein, Teilchen nachzufüllen, ohne die Ionentemperatur stark zu beeinflussen.

Für den Cluster-Injektor werden daher folgende Parameter angestrebt:

Beschleunigungsspannung: 1 MV
Mittlere Clustergröße: 1000 Atome pro Cluster
Elektrischer Strom: 0.1 A

Dies ergibt einen äquivalenten Strom von H-Atomen von 100 A bei einer mittleren Energie pro H-Atom von 1 keV. Die Zerlegung der Cluster soll während ihrer Neutralisierung durchgeführt werden.

Der gelieferte Teilchenstrom reicht allerdings höchstens dazu aus, die Nachfüllung für den Divertor-Betrieb etwa zur Hälfte zu übernehmen. Vollständige Teilchennachfüllung erfordert somit eine Kombination von Clusterinjektion, Neutralinjektion und Kaltgaszufuhr.

2. Laser-Plasma-Quelle

(M. Salvat, W. Amenda, H. Baumhacker, I. Bozsik, H. Brinkschulte, K. Büchl, Ch. Grein, M. Hashmi, R. S. Lang, L. Lengyel, W. Riedmüller. Zeitweise: C. T. Chang*)

Die Arbeiten auf dem Gebiete der Anwendung kondensierter Deuterium-Pellets zur Füllung von magnetischen Einschlußexperimenten wurden in zwei Richtungen weitergeführt:

1. Anwendung von Pellets, die mit Hilfe intensiver Laserstrahlung sehr rasch in ein Plasma umgewandelt werden, zur Füllung von Maschinen des Typs Stellarator.
2. Anwendung von Pellets, die in ein schon vorhandenes Plasma injiziert werden, mit dem Ziel der Nachfüllung von Neutralgas.

Die Eigenschaften von lasererzeugten Plasmen in magnetischen Einschlußkonfigurationen werden in verschiedenen Instituten untersucht. Das Projekt befaßt sich gegenwärtig mit der Füllung des Stellarators W II B mit lasererzeugten Plasmen. Diese Methode ermöglicht es, den Stellarator ohne toroidale Entladung zu betreiben. Außerdem hofft man, auf diese Weise die Verunreinigung des Plasmas klein zu halten. Zum anderen sind die Arbeiten des Projekts auf die Erzeugung und Untersuchung von Ablationsplasmen gerichtet. Durch Injektion von Pellets in den PULSATOR soll dessen Plasmadichte von innen heraus erhöht werden. Diese Arbeiten sind gegenwärtig wichtig für die Tokamak-Linie. Das Experiment wird gemeinsam mit dem PULSATOR-Team durchgeführt. Die diesem Experiment zugrundeliegende Methode der „kalten Nachfüllung“ ist – langfristig gesehen – wichtig für die Entwicklung von Verfahren zur Brennstoffversorgung von Fusionsreaktoren.

2.1 Die Entwicklung von Pelletquellen

Während die Stanzquelle und die Schneidequellen sich bereits im Einsatz befinden, wird die Entwicklung der Tropfenquelle fortgesetzt. Eine verbesserte Version dieses Quellentyps wurde von der Industrie nach unseren Angaben gebaut, Ende 1976 geliefert und in Garching in Betrieb genommen. Die Quelle liefert Wasserstofftropfen mit einem Durchmesser von ca. 300 µm mit einer Frequenz von 10³ pro Sekunde.

2.2 Lasererzeugte Plasmen und Füllung von W II B

Während im Jahre 1975 die Möglichkeit, mit intensiver Laserstrahlung aus fallenden Pellets Plasmen zu erzeugen, geprüft und diese Frage positiv beantwortet werden konnte, wurden die Experimente im Jahre 1976 dem Studium der lasererzeugten Plasmen gewidmet.

Abb. 3 zeigt eine Skizze der Anlage in der Halle L3. In der Vakuumkammer, die neben dem Stellarator W II B aufgebaut ist, wurden die Eigenschaften der lasererzeugten Plasmen studiert. Mit einer Pellet-Schneidequelle wurden Pellets von 300 µm Durchmesser und 300 bis 500 µm Länge produziert. Die

*) Danish Atomic Energy Commission, Roskilde, Dänemark

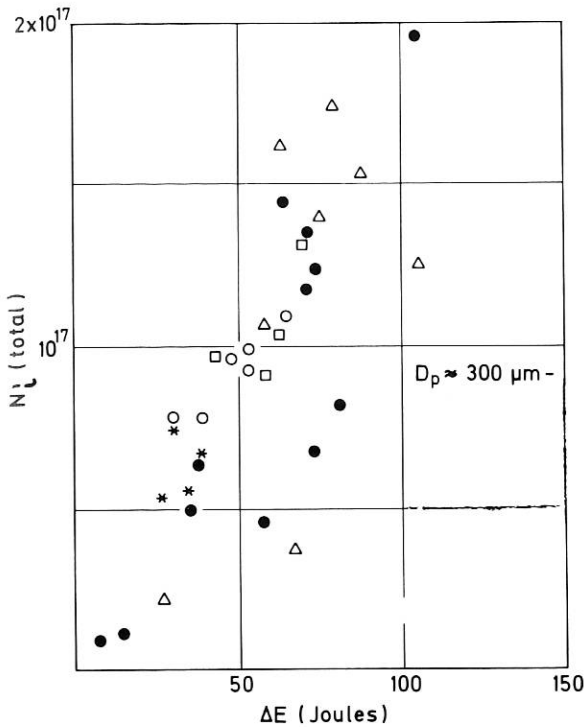


Abb. 4: Anzahl der erzeugten Ionen als Funktion der absorbierten Laserenergie (interferometrische Messungen)

$E_{inc} = 105 \text{ J}$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $\Delta E \equiv E_{inc} - (E_{trans} + E_{refl})$
Pellet vor der Brennebene bei einem Abstand von

- 1 mm
- △ 2 mm
- 3 mm
- 4 mm
- ◆ 6 mm

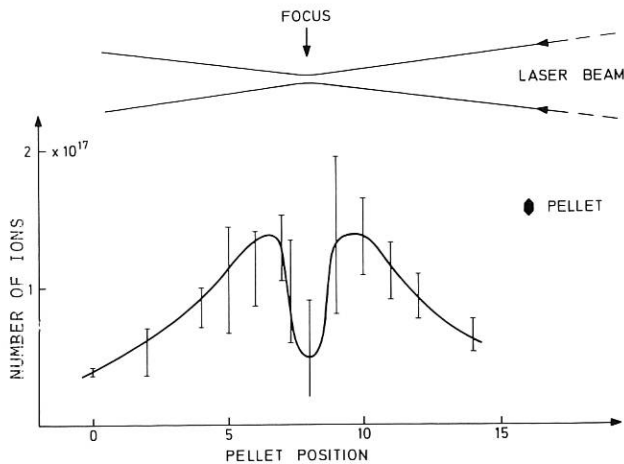


Abb. 5: Anzahl der produzierten Ionen als Funktion der Pelletlage bezüglich der Brennebene.
Fokussdurchmesser 250 μm

Abbildungen 6, 7 und 8
siehe Seiten 92 und 93!

Abb. 5 gibt eine andere Darstellung der experimentellen Ergebnisse zur Optimierung der Pelletlage bezüglich des Laserfokus. Die Zahl der produzierten Ionen zeigt ein Maximum 1 bis 2 mm vor (oder nach) der Fokusslage, wo der Pelletdurchmesser gleich dem Laserstrahl wird.

Experimentelle Informationen, die man bei jedem Laserpuls erhält, sind in Abb. 6 zusammengefaßt. Es sind

- eine Schattenaufnahme (N_2 -Laser mit 1 ns Pulsdauer), ca. 20 ns nach Ende des Energielaserpulses aufgenommen; die restliche Materie expandiert mit Geschwindigkeiten von 10^3 bis 10^4 m/s.
- Ein Photo des Plasmas, das das emittierte Licht integriert wiedergibt. Der Durchmesser des Lichtflecks ist mit der Zahl der erzeugten Ionen korreliert. Bei gutem Treffen ist der Lichtfleckdurchmesser größer.
- Elektrostatische Signale, mit denen man die Geschwindigkeit der erzeugten Ionen ermittelt. Es ergeben sich Geschwindigkeiten von einigen 10^5 m/s, entsprechend Temperaturen von ca. 10^7 Grad. Außerdem geben die Sondensignale Auskunft über die Winkelverteilung der Ionen. Wir fanden, daß die Geschwindigkeit in Richtung Laserstrahl zweimal so groß war wie in „reflektierter“ Richtung. Die Schattenaufnahmen des expandierenden Plasmas im Licht des Nd-Lasers zeigten, daß das Plasma senkrecht zur Laserrichtung symmetrisch expandiert. Die Interferogramme senkrecht zur Laserrichtung genommen zeigen eine Unsymmetrie in der Expansion des Plasmas in qualitativer Übereinstimmung mit den Sondensignalen. Die Zahl der produzierten Ionen wurde aus diesen Interferogrammen berechnet.

Die maximalen Meßwerte von $2 \cdot 10^{17}$ Ionen stimmen mit den aus numerischen Berechnungen gefundenen Ergebnissen überein. Wie man aus Abb. 7 entnehmen kann, beträgt die Gesamtzahl der produzierten Ionen $3 \cdot 10^{17}$ für eine Laserenergie von 100 J und einen Pelletdurchmesser von 300 μm , während die absorbierte Energie 50% der Laserenergie, d. h. 50 J, ist.

Weitere numerische Berechnungen wurden durchgeführt, um die Lasereigenschaften zu finden, die zu einer vollkommenen Ionisierung führen sollen. Diese Berechnungen zeigen, daß mit einem längeren Laserpuls oder mit zwei aufeinanderfolgenden Laserpulsen ein höherer Ionisierungsgrad erreicht werden kann.

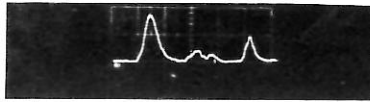
Abb. 8 ist ein Beispiel solcher numerischer Ergebnisse: Der Laserpuls ist aus einem Vorpuls von 10 J Energie und 30 ns Dauer und einem unmittelbar folgenden Hauptpuls von variabler Energie und 30 ns Dauer zusammengesetzt. Danach wird eine vollständige Ionisation oberhalb einer Hauptpulsenergie von 60 J erreicht. Die absorbierte Energie beträgt dann 50% der Laserenergie.

Aufgrund dieser Berechnungen wurde ein zweiter Oszillator (siehe Abb. 3, in dem die 2 Oszillatoren skizziert sind) gekauft und parallel zu dem schon vorhandenen installiert. Mit dem neuen Oszillatorensy-

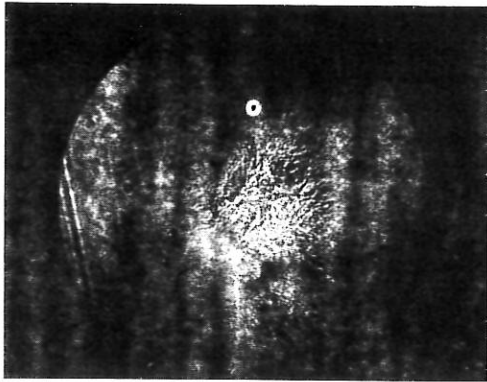
Pellet Nr. 5904

Abmessungen: $\varnothing = 0,30 \text{ mm}$
L = 0,50 mm

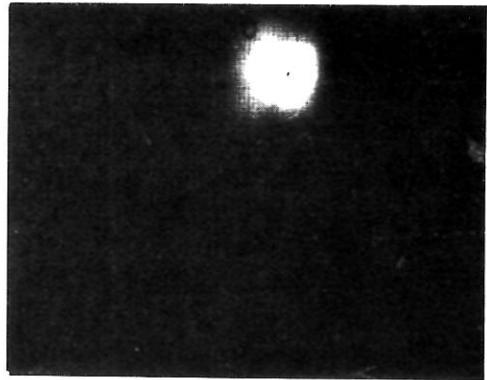
Laserenergie: 137 J, transmitt. Energie: 25,2 J, reflekt. Energie: 4,5 J



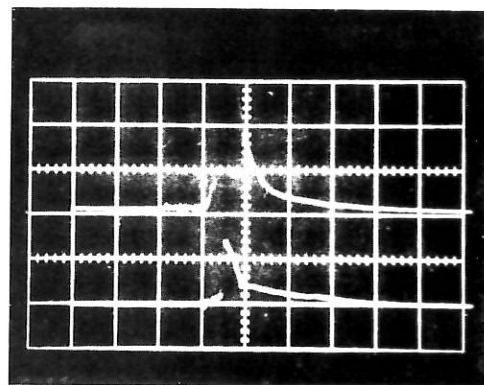
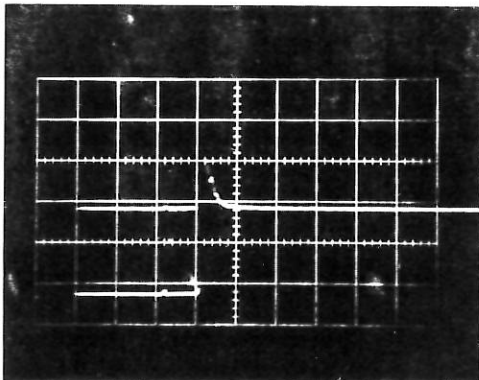
Signal des einfallenden transmittierten reflektierten Laserlichts



Schattenphotographie mit N₂-Laser



Zeitintegriertes Plasmalicht



Signale von elektrostat. Sonden

Abb. 6



Interferogramm mit Rubinlaser

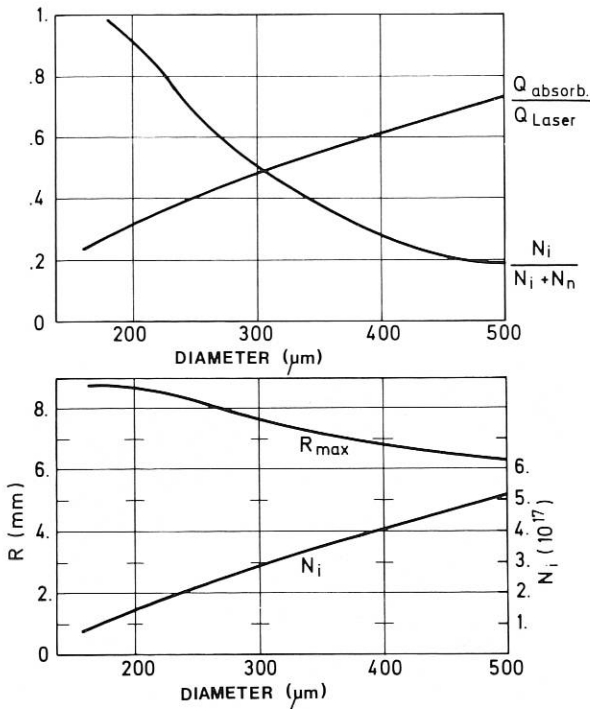


Abb. 7: Wirkungsgrad der Pelletheizung als Funktion des Pelletradius.

Laser: 100 J/30 ns, $\lambda = 1.06 \mu$
Sphärisches Modell

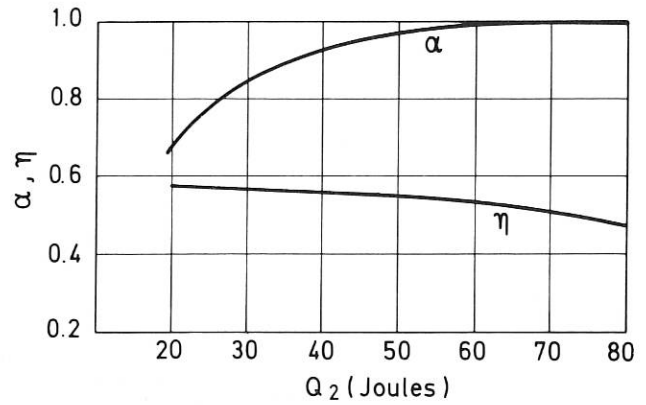


Abb. 8: Wirkung des zweiten Laserpulses auf Ionisationsgrad α und Wirkungsgrad η der Energieabsorption.

stem können nun Einzelpulse mit einem Abstand bis zu 70 ns und wählbarem Energieverhältnis erzeugt werden.

Nach Abschluß dieser Vorversuche ohne Magnetfeld wurden Ende 1976 die Experimente am Stellarator W II B aufgenommen. Die Fallhöhe der Pellets ist hier aus mechanischen Gründen größer. Sie beträgt 30 cm im Vergleich zu 19 cm Fallhöhe im Kessel. Das scheint jedoch die Pelletdispersion im Laserfokus nicht wesentlich zu beeinflussen. Plasmen aus freifallenden Deuteriumpellets wurden hier zum ersten Male in der Plasmaforschung auf der Achse eines Stellarators erzeugt. Die mit Hilfe von Mikrowellen-Interferometrie gewonnenen vorläufigen Ergebnisse deuten darauf hin, daß die Lebensdauer des Laserplasmas viel länger (einige Größenordnungen) ist als die eines Plasmas, das durch Driftbewegungen an die Wände getrieben würde. Es scheint, daß die Driftbewegungen nicht so gefährlich sind, wie Abschätzungen befürchten ließen.

2.3 Expansion eines Laserplasmas im Magnetfeld

Dieses Experiment soll Aufschluß geben über die Expansion eines lasererzeugten Plasmas im Magnetfeld beim Übergang von hohen zu niedrigen β -Werten. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 9 dargestellt. Die Strahlung eines Nd-Glaslasers (10 J, 50 ns) wird auf Polyäthylenkugeln ($\phi = 0,2 \text{ mm}$) fokussiert ($f = 22 \text{ cm}$). Zur Diagnostik des in einem Magnetfeld bis zu 8 kG produzierten Plasmas werden folgende Methoden eingesetzt:

- Infrarot-Interferometrie (Mach-Zehnder) mit einem CO_2 -Laser (3 J, 100 ns) als Lichtquelle
- Kurzzeitschattenphotographie mit einem N_2 -Laser (200 μJ , 1 ns)
- Elektrische Sonden
- Magnetfeldsonden

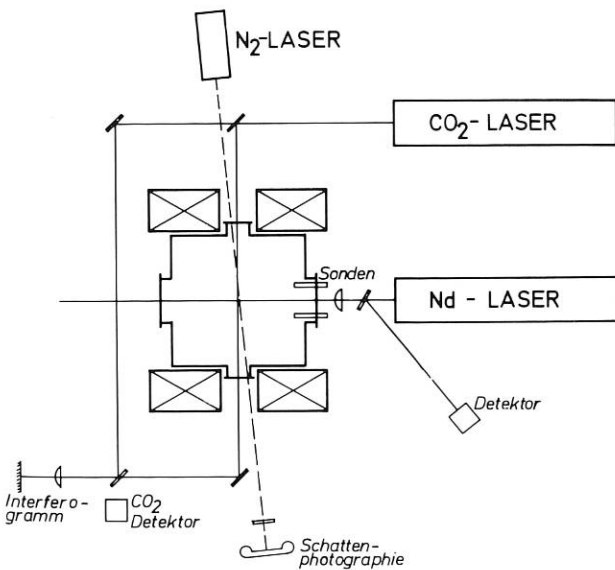


Abb. 9: Versuchsanordnung zur Untersuchung der Expansion eines Plasmas im Magnetfeld.

Zum Test der Infrarot-Interferometrie wurden Laserplasmen an ebenen Targets erzeugt (Abb. 10a). Die Auswertung des Interferogramms zeigt Abb. 10b.

2.4 Injektion von Deuteriumpellets und Pelletexperimente am PULSATOR

Durch die Injektion von Pellets in ein Tokamakplasma kann versucht werden, in einen Bereich höherer Plasmadichte zu gelangen. Im Gegensatz zur Dichteerhöhung durch Gaseinlaß kann durch Pellets prinzipiell die Dichte und Temperatur auch im Inneren des Toka-

makplasmas direkt beeinflußt werden. Ablationsmessungen werden gleichzeitig durchgeführt. Dieses Experiment wird in Zusammenarbeit mit der Projektgruppe PULSATOR durchgeführt.

Zur Untersuchung der genannten Probleme wurde ein Experiment am PULSATOR aufgebaut (Abb. 11). Es besteht in seinen wesentlichen Teilen aus der Pelletquelle (Stanzquelle, siehe Jahresbericht 1974, S. 86), den Steuerungen für die Quelle, der Synchronisation mit dem PULSATOR und mehreren Diagnostiken für die Pellets.

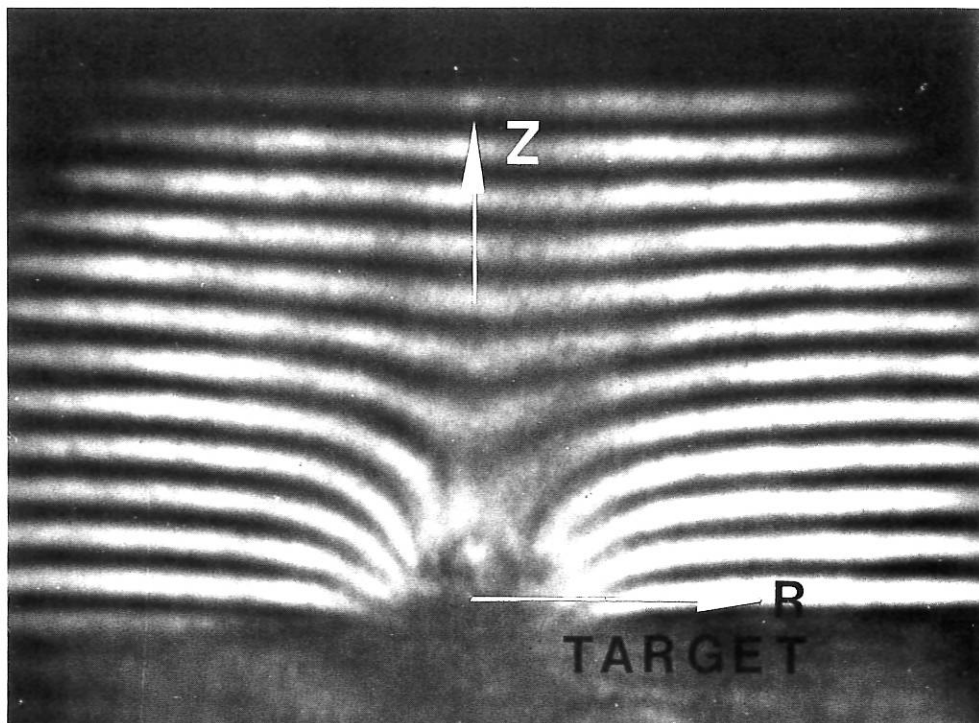


Abb. 10a:
Infrarot-Interferogramm
eines lasererzeugten
Plasmas
(200 nsec
nach der Erzeugung,
Neodymlaser 3 J)

a

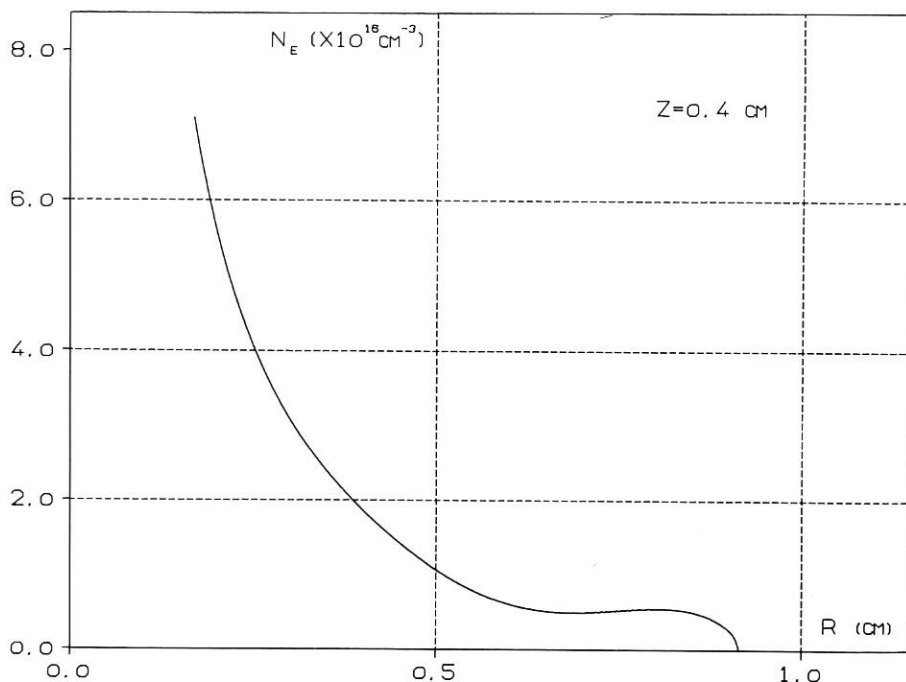


Abb. 10b:
Elektronendichte-
verteilung von 12a
Z-Abstand
vom Target,
R-Abstand von der
Symmetrieachse
des Plasmas

b

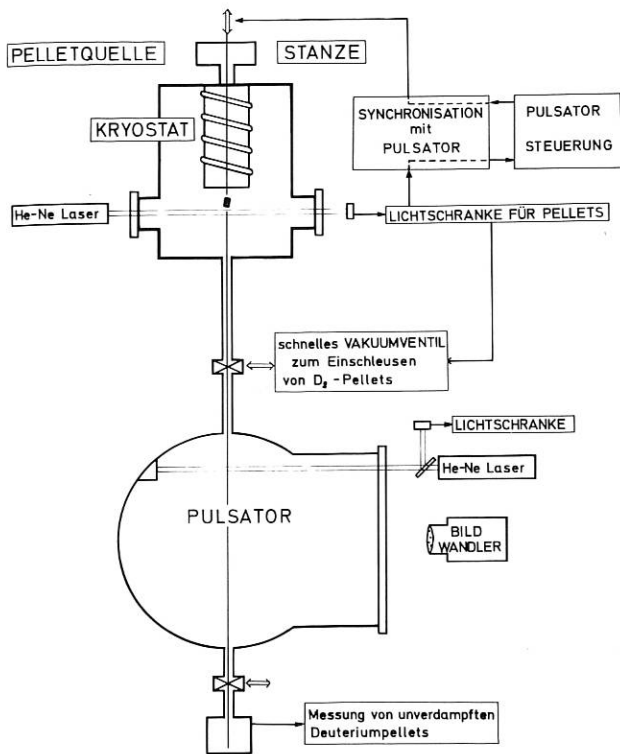


Abb. 11: Versuchsanordnung für die Injektion von Deuterium-Pellets in den PULSATOR.

Die technischen Probleme des Betriebes der Pelletquelle unter PULSATOR-Bedingungen wurden bis auf Punkt c) gelöst. Bei Punkt c) wird an der Lösung gearbeitet.

- Vollständige Fernsteuerung der Pelletquelle (Deuterium-Einfüllung, Helium-Kühlkreis, Bewegung der Stanznadel).
- Zeitliche Synchronisation der Pelleterzeugung und des Pelletaustoßes aus der Quelle mit dem Ablauf der PULSATOR-Steuerung.
- Reproduzierbare Pelleterzeugung über 6–8 Stunden (Langzeitverhalten besonders in der inneren Temperaturverteilung und der Kryopumpleistung der Quelle).

Die Deuterium-Pellets von 400 μm Durchmesser und ca. 600 μm Länge fallen aus 1,20 m Höhe in den PULSATOR-Torus. Aus Abschätzungen ergibt sich, daß die Pellets infolge ihrer geringen Größe (entsprechend einer PULSATOR-Füllung in der Niedrigdichteregion) und der kleinen Geschwindigkeit (5 m/sec) vermutlich bereits in den Randzonen des Plasmas vollständig erodiert werden. Deshalb wird der PULSATOR bei den ersten Versuchsserien erst gezündet, wenn sich das Pellet bereits auf oder in der Nähe der Torusachse befindet. Die Ablation erfolgt dann während der ansteigenden Plasmadichte und -temperatur. In ersten Experimenten konnten durch Mikrowelleninterfero-

metermessungen Erhöhungen der Plasmadichte in Achsennähe um einen Faktor 1,5 beobachtet werden. Diese Dichteerhöhungen wurden innerhalb von 20 msec wieder abgebaut, ohne daß Abbruchinstabilitäten auftraten. Weiterhin wurden Erhöhungen im Neutralteilchenfluß und in der harten Röntgenstrahlung beobachtet. Die ungünstige Position der Pelletinjektion in der Nähe des Limiters ließ bisher eine direkte Beobachtung des erodierenden Pellets nicht zu.

In mehreren Experimenten traf das Pellet auf die Plasmasäule. Auch in diesen Fällen konnte eine kleine Dichteerhöhung auf der Achse beobachtet werden. Es traten außerdem Änderungen in der H_α -Emission des Plasmas auf.

Die bisherigen wenigen Experimente zeigten, daß durch Pellets die Dichte des PULSATOR-Plasmas erhöht wird.

3. Programm „Magnete für die Fusion“

3.1 Arbeiten im IPP

(A. Knobloch)

Im Berichtsjahre wurde beim IEKP III der GfK Karlsruhe das abgesprochene und vertraglich fixierte Programm implementiert. Die vorgesehenen gemeinsamen Programmgespräche wurden durchgeführt.

Im IPP wurden die begonnenen Studien zur Parameterbestimmung künftiger fusionsrelevanter Supraleiternagnete fortgesetzt und ein ausführlicher Überblick über den gegenwärtigen Kenntnisstand zu den Entwurfsgesichtspunkten und Randbedingungen derartiger Strukturen zusammengestellt. Diese Arbeiten wurden auf internationalen Tagungen vorgetragen.

Im FPCC subcommittee on superconducting magnets for fusion der International OECD Energy Agency wurde der Vertragsabschluß über eine internationale Kooperation zur Schaffung einer Großversuchsanlage für die Erprobung großer torusrelevanter Supraleiterspulen in Oak Ridge (USA) vorbereitet (EURATOM-Vertreter in dem 7köpfigen Ausschuß: A. Knobloch, A. Martinelli, z. Zt. Saclay).

Ein detaillierter Bericht über die Arbeiten zum Programm in Karlsruhe wird anschließend gegeben.

3.2 Arbeiten in der GfK Karlsruhe

(P. Komarek, C. Dustmann, J. Erb, H. Köfler (ztw.), G. Krafft (ztw.), H. Krauth (ztw.), W. Maurer, G. Nöther, E. Seibt, A. Ulbricht)

Die Arbeiten im Rahmen des gemeinsamen GfK/IPP-Vorhabens „Magnete für die Fusion“ wurden im Jahre 1976 mit der Hauptzielrichtung der Demonstration der Baubarkeit und des sicheren Betriebs von supraleitenden Torusmagneten für Fusionsexperimente fortge-

setzt¹⁾ ²⁾. Es wurde mit der Konstruktion eines Torus-systems „TESPE“ begonnen, welches als flexibles Experimentiergerät für die Fusionsmagnetentwicklung in der GfK dienen soll. Weiter ergab sich durch ein Angebot der US-ERDA die Möglichkeit einer Zusammenarbeit mit dem ORNL im Rahmen eines IEA-Vertrages zur Mitwirkung an dem amerikanischen „Large Coil Projekt“ (LCP). Es ist geplant, zunächst mit einer, später mit einer zweiten Testspule an dem Projekt teilzunehmen, als Zwischenschritt zum Demonstrationsaufbau INTOS.

Das Experiment ESPE 2 im Rahmen der Untersuchungen von Pulsagnetsystemen wurde fortgeführt.

3.2.1 Entwurfsgrundlagen

Das Programmsystem HEDO des IPP zur Berechnung von Magnetfeldern und magnetischen Kräften in toroidalen Wicklungsanordnungen wurde erweitert. Zur Berechnung der mechanischen Festigkeit der Torusspulen stehen in der GfK, in anderen Forschungseinrichtungen (IPP, Rutherford Lab.) sowie in der Industrie eine Vielzahl von Finite-Element-Programmen zur Verfügung. Einfache Testbeispiele wurden bisher mit den Programmen SAP und FINESSE gerechnet. Die Ankopplung von HEDO an verschiedene FE-Programme ist in Vorbereitung.

Im IPP wurden Rechnungen mit den gekoppelten Programmen HEDO und SAP durchgeführt, die zur Absicherung der Auslegungsdaten von TESPE herangezogen wurden.

Zum Problemkreis der Skalierbarkeit von kleinen Torusanordnungen auf Tokamak-Magnete mit Reaktor-dimension wurden erste Berechnungen durchgeführt³⁾ und auch Kostenabschätzungen für Fusionsmagnete angegeben.

3.2.2 Torusspulen

Im Laufe des Berichtszeitraumes wurden die Parameter des Torussystems TESPE festgelegt. Der Torus besteht aus sechs supraleitenden Einzelspulen in einem gemeinsamen Vakuumgefäß (Abb. 12). Der Torusradius beträgt $R_0 = 0.5$ m, die D-förmigen Spulen besitzen eine horizontale Bohrung der Wicklung von 0.49 m. Das Maximalfeld beträgt $B_{max} \approx 7.5$ T bei einem Leiterstrom von 7 kA. Die gesamte gespeicherte Energie beträgt ~ 10 MJ. Das Experiment soll als möglichst flexibles Experimentiergerät für die Fusionsmagnetentwicklung in der GfK dienen. Hauptaufgaben sind

- Untersuchung des Verhaltens eines supraleitenden Torus im Normalbetrieb und bei Störfällen,
- Tests fortgeschrittener Leiter im toroidalen Magnetfeld
- Entwicklung und Erprobung von Diagnostik im Hinblick auf optimale Ausstattung der LCP-Spule.

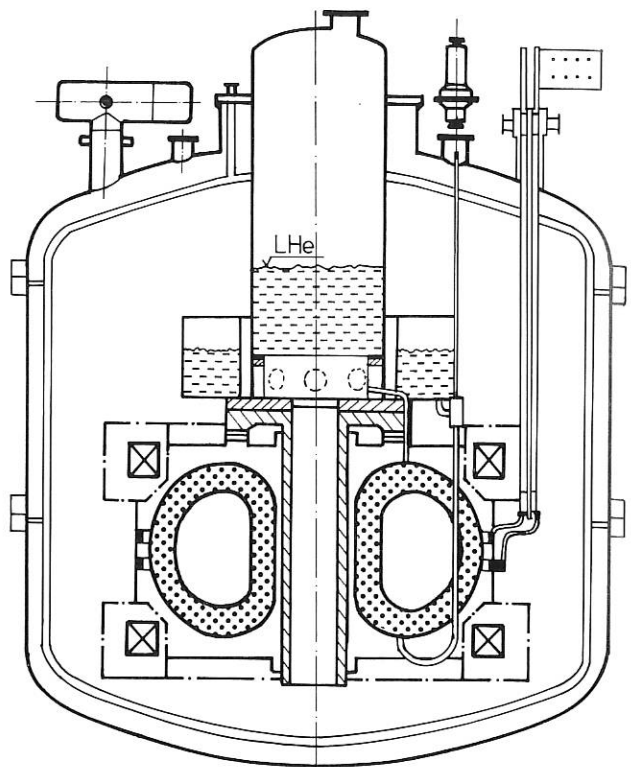


Abb. 12: Gesamtaufbau TESPE

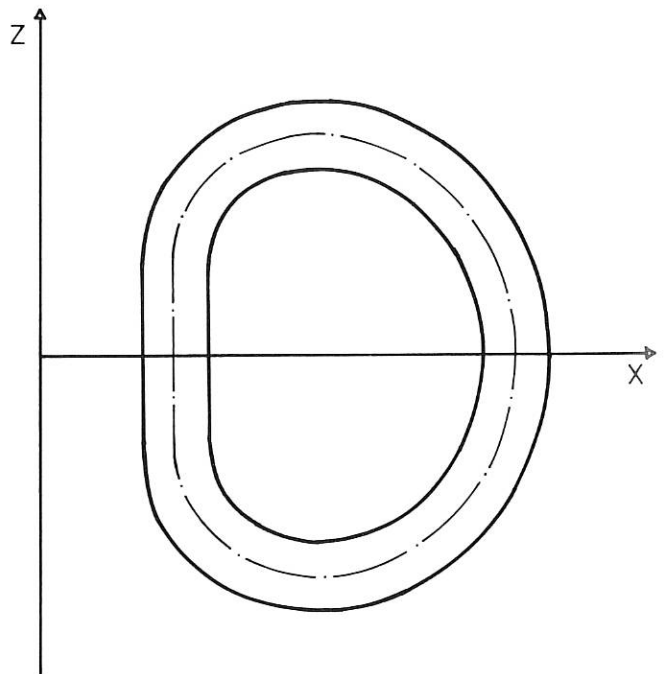


Abb. 13: TESPE-Spulenform

Die Untersuchung des Verhaltens unter Wechselfeldbelastung kann nach Einbau von Poloidalfeldspulen erfolgen.

¹⁾ Heinz, W.: Superconducting magnets. A. Some fundamental and their state of art. Internat. School of Fusion Reactor Technology, Erice, Italy, 20. September – 1. Oktober 1976

²⁾ Komarek, P.: Superconducting Magnets in the World of Energy, especially in Fusion Power. Cryogenics, 16 (1976) S. 131–42

³⁾ Arendt, F., Brechna, H., Erb, J., Komarek, P., Krauth, H., Maurer, W.: Models for large superconducting toroidal magnet systems. 9. Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, 14.–18. Juni 1976

Die Spulenform (Abb. 13) wurde mit Hilfe des Programms HEDO optimiert. Die Entwicklung des Supraleiters für TESPE zusammen mit der Industrie befindet sich in fortgeschrittenem Stadium (siehe Pkt. 3.2.3). Die Konstruktion der Hauptkomponenten (mechanische Strukturen, Vakuumtank, Kryoeinrichtungen usw.) wurde begonnen.

Bei der zu bauenden Testspule für das LCP handelt es sich um eine D-förmige Spule mit einer horizontalen Bohrung von 2.5 m und einer vertikalen Bohrung von 3.5 m, so daß eine Extrapolation auf Spulen bis zu doppelter Größe, wie sie in Tokamak-Experimenten der nächsten Generation erforderlich werden können, möglich ist. Der Test der Spule soll 1980/81 in der „Large Coil Test Facility“, deren Standort wahrscheinlich das ORNL/USA sein wird, erfolgen. Dabei wird die LCTF aus einem „Compact Torus“ mit sechs Spulen bestehen, wobei jeweils eine Spule als Testspule fungieren kann.

Im Laufe des Berichtsjahres wurde sowohl an der technischen Definition der LCTF, wie an der Aufstellung der Spezifikationen der LCP-Spulen mitgearbeitet.

Generelle Überlegungen zur Spulenkonstruktion und insbesondere zur Leiterentwicklung für eigene LCP-Spule, die zusammen mit der Industrie gebaut werden soll, haben begonnen.

3.2.3 Leiterentwicklung

Eine Studie über mögliche Leiterkonzepte für Torusspulen wurde durchgeführt ¹⁾, ²⁾, ³⁾. Sie bietet eine vergleichende Übersicht über den gegenwärtigen Stand der Supraleitertechnologie und über die Anforderungen an den Leiter von Spulen für Fusionsexperimente. Ein Leiterkonzept für die Torussysteme TESPE und LCP wurde entwickelt.

Bei dem Leiter für TESPE handelt es sich um einen NbTi/Cu-Flachleiter (8 kA/8 T) aus 24 Einzelleitern, die zur mechanischen Verstärkung um einen Edelstahlkern verseilt sind. Der Leiter für LCP beruht auf dem gleichen Konstruktionsprinzip, ist im einzelnen jedoch komplizierter aufgebaut, da er wegen der hohen gespeicherten Energie in LCP aus Gründen der Betriebssicherheit und des Spulenschutzes kryogen stabilisiert werden muß.

Die Weiterentwicklung der Leiterkonzepte zur Fertigungsreife wurden zusammen mit Vacuumschmelze/Hanau – zunächst für den TESPE-Leiter – in Angriff genommen. Messungen zur mechanischen Festigkeit verschiedener Kernmaterialien wurden durchgeführt und eine Auswahl (Vacronium 80) getroffen.

An Einzelleitern sowie an ersten Seilproben wurden im IEKP und an der Leitertestanlage im CERN ($B_{max} = 6\text{ T}$, $I_{max} = 15\text{ kA}$, kalte Bohrung 364 mm) Messungen durchgeführt. Zur I_c -Ermittlung bis maximal 15 kA an Kurzproben- und Testspulen wurde ein vorhande-

nes Probenträgersystem umgerüstet und mit einer Heliumgas-gekühlten Stromzuführung für 16 kA ausgestattet.

Für Zugbelastungsmessungen ist der Probenträger zusätzlich mit einer mit Helium hydraulisch arbeitenden Druckvorrichtung ausgerüstet. Damit können maximal Zugkräfte bis 85000 N auf die Proben übertragen werden.

Der TESPE-Leiter erreichte sowohl im kraftfreien, als auch im durch Lorentzkräfte expandierten Zustand den maximal zur Verfügung stehenden Strom von 15 kA bei $B = 5\text{ T}$ und $T = 4.2\text{ K}$. Einige Instabilitäten im elektrischen Verhalten des Leiters deuten auf „Training“ hin. Um Quenchverhalten, Trainingseffekte u. a. zu untersuchen, wurde die Probentemperatur lokal auf 6–7 K mit Hilfe einer Heizung (Konstantan-Drahtwicklung) erhöht. Durch entsprechende Variation der Heizleistung bis zum Normalübergang der Proben wurden kritische Stromwerte in Abhängigkeit vom Magnetfeld gemessen. In einer linearen Extrapolation konnte damit gezeigt werden, daß innerhalb des Fehlerbereiches die ermittelten kritischen Stromwerte bei 4.3 K die erwarteten Sollwerte (gegeben durch Messungen an Einzelleitern) des TESPE-Flachseileiters erreichen (siehe Abb. 14).

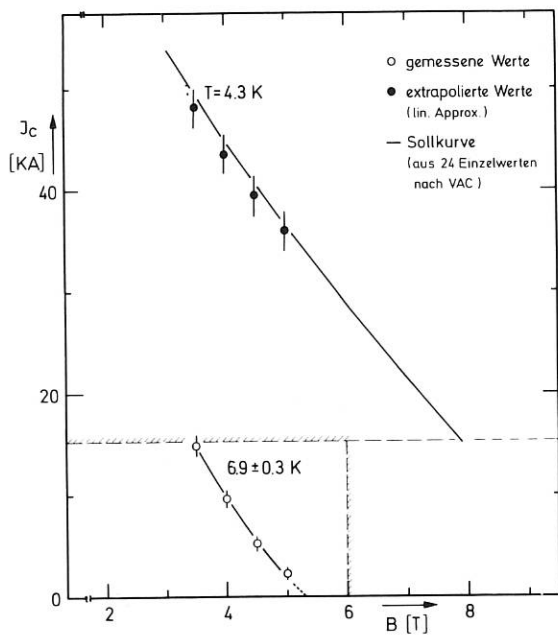


Abb. 14: J_c -Kurven bei 4.3 und 6.9 K von TESPE-Flachseileiter (24 NbTi/Cu-Einzeldrähte verseilt um einen in der Mittelebene isolierten Stahlbandträger, mit Ag-Sn verlötet) in Abhängigkeit vom Magnetfeld. Die Werte bei 4.3 K sind durch lineare Extrapolation gewonnen. Die ausgezogene Kurve ist die aus 24 Einzelwerten nach VAC-Angaben gewonnene Sollkurve.

1) Seibt, E. (HRSG.), Dustmann, C. H., Jüngst, K. P., Komarek, P., Krafft, G., Krauth, H., Maier, P., Ries, G., Schauer, W., Schmidt, C., Seibt, E., Turowski, P., (Mitarb.): Supraleitertechnologie für Fusionsmagnete. KFK-2359 (November 1976)
 2) Dustmann, C. H., Krauth, H., Ries, G.: Studies on design and tests of superconductors for tokamaks. 9. Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, 14.–18. Juni 1976
 3) Jüngst, K. P., Ries, G.: Supraleiter. OS 25 17 524 (28. Oktober 1976)

Bei mechanischen Messungen wurden die Leiterproben bis max. 3.5 t belastet und damit Dehnungen bis etwa 0.5% erzielt. Die beim Entlasten der Probe auftretende Arbeit A_{Hy} wird als innere Reibungsarbeit der Leiterkomponenten gedeutet. Gleichzeitig durchgeführte Strommessungen an belasteten Proben ergaben in diesem Dehnungsbereich keine Degradation der Stromtragfähigkeit.

Dynamische Belastungsuntersuchungen bei konstantem Strom (7 kA) und Feld (5 T) zeigten für das elektrische Verhalten des Leiters kritische Belastungswerte bei Dehnungen ab etwa 0.2%, wobei die zu erwartende Dehnung nach der spezifischen Zugkraftbelastung bei 0.12% liegt. Wiederholungsmessungen deuteten auch hier auf Trainingserscheinungen hin.

3.2.4 Pulsspulensysteme

Nach Abschluß des Tests der einzelnen Komponenten des Experiments ESPE 2 konnte das Experiment zu Beginn des Jahres in seiner Gesamtheit in Betrieb genommen werden. Die Erzeugung von Leistungspulsen zeigte, daß das System voll funktionsfähig ist. Die erzeugten Pulse hatten eine Leistung von 6 MW bei 12 kV Entladespannung. Die Zeitkonstante der Entladung betrug 10 ms bei einer Pulsanstiegszeit von 14 μsec ^{1), 2), 3), 4)}.

Wegen der Eigenschaft des supraleitenden Schalters, im Gleichstrombetrieb spontan normalleitend zu werden, wurde zunächst auf eine weitere Steigerung der Pulsleistung verzichtet. Zur Lösung der Probleme boten sich zwei Möglichkeiten an:

1. Änderung der Steuerzeiten der Entladung und die Entwicklung schneller, hochspannungsfester Quenchindikatoren.
2. Untersuchung der Ursache der spontanen Übergänge.

Bezüglich der Ursache der spontanen Quenche deuten Experimente auf Effekte hin, die auf die Stromaufteilung auf die einzelnen Adern des Kabels im supraleitenden Schalter zurückzuführen sind.

Für die Untersuchungen bezüglich der Energieversorgung der gepulsten Spulen bei Fusionsreaktoren wurde zunächst vor allem der Einsatz elektrischer Maschinen untersucht^{5), 6)}.

(Eine ausführliche Aussage zum Programm „Magnete für die Fusion“ steht im Jahresbericht 1976 der GfK Karlsruhe.)

4. Supraleitender W VII-Prototypmagnet

(K. H. Schmitter, W. Amenda, M. Hien, C. Künzner, P. Krüger, H. Lohnert, Ferner zeitweise: C. Dustmann⁷⁾, A. Knobloch, M. Kottmair, M. Pillsticker)

Das Testprogramm der Prototypspule sah im Jahre 1976 abschließende Messungen unter simulierten Torusbedingungen vor. Dazu wurde die stationäre magnetische Umgebung einer Einzelspule im Torusverband durch das Feld zweier auf der gleichen Achse symmetrisch angeordneter wassergekühlter Spulen grob nachgebildet. Die Bereitstellung der benötigten Gleichstromleistung von 6 MW aus der Stromversorgungsanlage des Instituts bereitete erhebliche Schwierigkeiten, so daß nach einem gescheiterten Versuch im Februar der wichtigste Teil des Meßprogramms erst Mitte Dezember durchgeführt werden konnte. Der experimentelle Teil der Arbeit ist damit beendet; die Meßergebnisse werden zur Zeit ausgewertet.

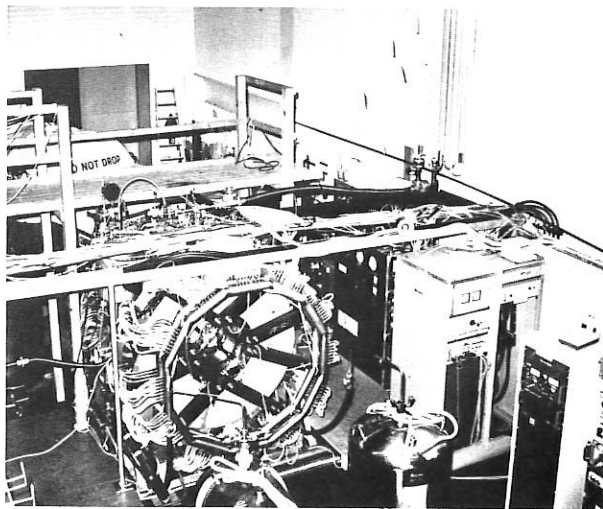


Abb. 15: Prüfstand mit normalleitenden Simulationsspulen für den supraleitenden W VII-Prototypmagneten.

¹⁾ Ulbricht, A.: Dynamic behaviour of a resistive transfer circuit with a superconducting switch. 9. Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, 14.-18. Juni 1976

²⁾ Ulbricht A., Krauth, H., Komarek, P.: The study of high voltage problems in a superconducting power pulse generator. Internat. Cryogenics Engineering Conference, Grenoble, 11.-14. Mai 1976

³⁾ Katheder, H., Zahn, G.: Cryogenic installation for a 100 J storage experiment. Internat. Cryogenics Engineering Conf., Grenoble, 11.-14. Mai 1976

⁴⁾ Dustmann, C. H., Dick, P.: Schaltungsanordnung zum Übertragen elektrischer Energie. DAS 24 61245 (8. April 1976)

⁵⁾ Köfler, H., Maurer, W.: Discharge of a superconducting energy storage system; A mathematical approach. 9. Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, 14.-18. Juni 1976

⁶⁾ Köfler, H., Komarek, P.: Design problems for electric machines in supply systems of magnetic confinements for fusion-reactors. Internat. Konferenz Elektrische Maschinen, Wien, 13.-15. September 1976

⁷⁾ Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe

5. Systemstudien

(J. Raeder, K. Borraß, R. Bünde, W. Dänner, H. Herold, G. Müller, M. Söll, H. Weichselgartner¹⁾, G. Emmert²⁾, H. J. Odenthal³⁾)

Der größte Teil der Arbeiten war der mathematischen Modellierung von Fusionskraftwerken gewidmet. Untersuchungen, die hiervon zwar angeregt wurden, derzeit aber noch nicht für die Modelle verwendet werden, sind unter der Überschrift „Weitere reaktororientierte Arbeiten“ zusammengefaßt. Darüberhinaus war viel Zeit für die Abfassung einer Studie für die AGF-ASA erforderlich. Die experimentellen Arbeiten zur Tritiumabscheidung wurden im Rahmen eines Auftrages an die ZTE durchgeführt.

5.1 Arbeiten zur mathematischen Modellierung von Fusionskraftwerken

Die Arbeiten an den Komponenten, die zur Aufstellung der geplanten mathematischen Modelle von Fusionskraftwerken notwendig sind, wurden 1976 soweit durchgeführt, daß zu Beginn 1977 mit der Zusammenstellung des ersten Kraftwerksmodells begonnen werden kann. Es wird sich dabei, wie vorgesehen, um ein „Tokamak-Kraftwerk“ handeln.

Das 0-dimensionale Modell zur Simulation des Plasmas wurde weiter ausgebaut. Die Haupterweiterung bestand im Einbau von Neutralteilchenheizung auf der Basis eines Testteilchenmodells. Die dadurch zunächst verlängerte Rechenzeit wurde durch eine verbesserte Integrationsroutine wieder reduziert. Die Möglichkeit, Nebenbedingungen in Form von β -Limitierungen zu berücksichtigen, wurde eingebaut. In der ersten Version wurden der Strom I und der Sicherheitsfaktor $q(a)$ als freie Parameter vorgegeben. Nun werden I und $q(a)$ innerhalb des Rechenprogrammes selbstkonsistent zu den vorgegebenen Profilen bestimmt. Dazu wird die Gleichung für das Poloidalfeld gelöst. Als Anwendung wurde die Fusionsleistungsdichte in Abhängigkeit von der Form der Dichte- und Temperaturprofile studiert /IPP 4/140/.

Ferner wurde mit dem Modell der Einfluß einer eventuellen α -Akkumulation mit dem Einfluß der Wandmaterialakkumulation auf die Brenndauer eines Tokamaks für den Fall der „trapped ion“-Diffusion verglichen. Man findet selbst bei optimistischen Annahmen über die Reduzierung von Wandverunreinigungen einen geringen Einfluß der α -Teilchen auf die Brenndauer (Vortrag auf der Reaktortagung 1977).

Wegen der grundlegenden Wichtigkeit der Lebensdauer der ersten Wand wurde damit begonnen, ihr thermisches und mechanisches Verhalten unter dem Einfluß der Kernreaktionen im Wandvolumen (nukleare Heizung, Strahlenschäden) und der Wärme- und Strahlungsströme aus dem Plasma mathematisch zu erfassen.

Zu diesem Zweck wurden die Temperatur- und Spannungsverteilungen zunächst für stationäre Verhältnisse berechnet / IPP 4 / 143 /. Darauf aufbauend wurden die Effekte der Instationarität (Pulsformen aus dem Plasmamodell) behandelt. Die aus diesen Rechnungen resultierenden pulsierenden Temperatur- und Spannungsverteilungen bilden zusammen mit dem noch zu bearbeitenden Langzeitverhalten (Schwellen, Kriechen, Versprödung) die Basis für Aussagen über die zeitintegrierten Wandbelastungen, denen die Wand standhalten kann.

Beim Blanket wurden die systematischen Untersuchungen mit Hilfe des inzwischen fertiggestellten Neutronik-Photonik-Programmes INDRA / IPP 4 / 137 / fortgesetzt. Sie lieferten für Lithium-Edelstahl-Blankets die Abhängigkeit der Tritium-Brutrate, des Energiemultiplikationsfaktors, der räumlichen Leistungsdichteverteilung sowie der He- und H-Erzeugungsraten von den Blanketparametern (Brutzonendicke, Wanddicke, Strukturmaterialanteil und ^6Li -Anreicherungsgrad) (Abb. 16). Die Arbeit wird auf der Reaktortagung 1977 vorgetragen.

Ergänzt werden diese Studien durch die Berechnung von Aktivierung, Nachwärme und biologischem Gefährdungspotential von Edelstahl als Funktion der Betriebszeit und der Zeit nach dem Abschalten des Reaktors. Die Arbeiten an dem dafür erforderlichen Rechenprogramm werden, ausgehend von unseren Vorüberlegungen (Interner Bericht No. 6, Projekt Systemstudien), in Zusammenarbeit mit der Firma INTERATOM und unter Verwendung des Programmsystems INDRA durchgeführt. Ein besonderes Problem stellte die Beschaffung der notwendigen Wirkungsquerschnittsdaten dar; sie wurden uns schließlich vom Radiation Shielding Information Center in Oak Ridge und von der KFA Jülich zur Verfügung gestellt.

Um für die Magnetfelder von Anfang an eine erweiterungsfähige mathematische Beschreibung aufzubauen, wurde ein Programmsystem aufgestellt / IPP 4 / 142, IPP III / 31 /, das auf ausgearbeitete Rechenprogramme zurückgreift: „HEDO“ / IPP III / 24 / für den magnetischen Teil und „SOLID SAP IV“⁴⁾ für den mechanischen Teil. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Ausarbeitung von Verfahren geschenkt, die zur Automatisierung der Unterteilung der zu berechnenden Strukturen in Finite Elemente (IPP 4 / 148) und der Eingabe der Resultate von „HEDO“ in „SOLID SAP IV“ dienen. Diese Verfahren sind erforderlich, um einen exzessiven Zeitaufwand bei der Vorbereitung zu vermeiden. Zur Verminderung der Rechenzeiten wurden bei den „magnetischen Rechnungen“ auch analytische Methoden verwendet und auf ihre Genauigkeit untersucht / IPP 4 / 145 /. Das Programmsystem wurde bisher dazu verwendet, die maximal erreichbaren Magnetfelder als Funktion der kritischen Supraleiterdaten, des

¹⁾ Im Rahmen eines Auftrages an die Zentralen Technischen Einrichtungen des IPP

²⁾ University of Wisconsin/USA; im Rahmen eines einjährigen Gastaufenthaltes, teilweise im Projekt „Systemstudien“.

³⁾ Im Rahmen eines Auftrages an die Firma INTERATOM für insgesamt etwa fünf Monate im Projekt „Systemstudien“.

⁴⁾ Bathe K. J., Wilson E. L., Peterson F. E.: SAP IV (A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems) University of California, EERC. 73-11, Berkeley, Juli 1973 bzw. die überarbeitete Ausgabe vom April 1974.

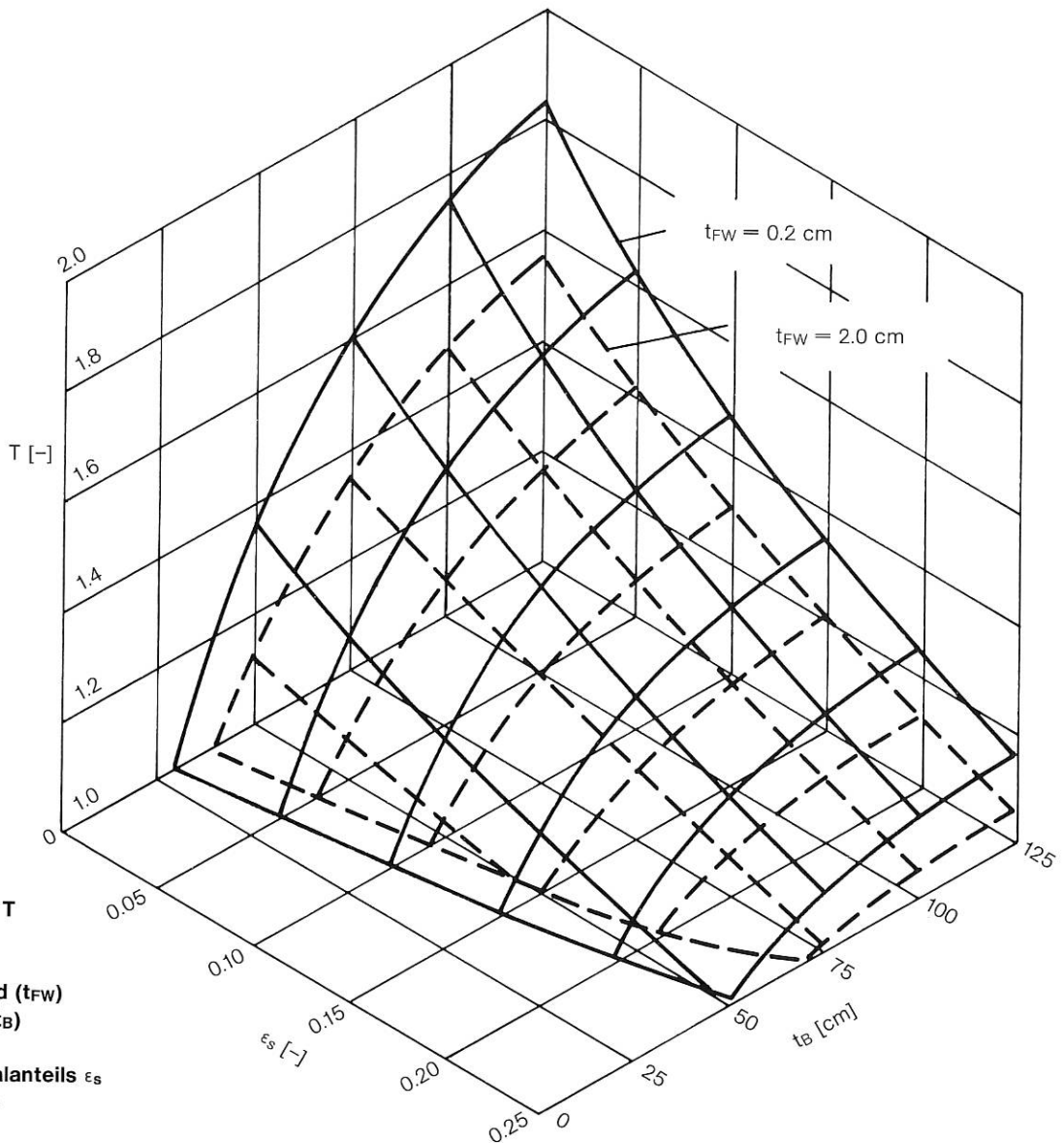


Abb. 16:
Tritiumbrutrate T
als Funktion
der Dicken
von erster Wand (t_{FW})
und Brutzone (t_B)
sowie des
Strukturmaterialanteils ϵ_s
in der Brutzone
für Lithium-
Edelstahl-Blankets.

Anteils an Stabilisierungs- und Armierungsmaterial und der zulässigen mechanischen Deformationen bzw. Spannungen zu bestimmen (Vortrag auf der Reaktortagung 1977) (Abb. 17). Außerdem wurden die verschiedenen Möglichkeiten untersucht, das Verhalten einer SL-Spule im vollen Torusverband in Anordnungen aus drei Einzelspulen zu simulieren (wird demnächst veröffentlicht). Es zeigte sich, daß die Möglichkeiten ziemlich beschränkt sind und daß in keinem Fall alle Kenngrößen (Magnetfelder, Kräfte, Spannungen, Deformationen) gleichzeitig ausreichend gut simuliert werden können.

Für Nb_3Sn wurde ferner der Einfluß von Strahlenschäden auf die kritischen Daten untersucht / 230 /. Dabei wurde nachgewiesen, daß für hinreichend gegen Neutronen abgeschirmte Magnete die Änderungen der kritischen Daten keine Limitierung für die Anwendung dieses Materials darstellt.

Im Zusammenhang mit der Vorbereitung integraler Betrachtungen (Energiebilanz, Kraftwerksmodell, Optimierung) wurden die bisher zu den Entwürfen von Tokamak-Kraftwerken veröffentlichten Kostenrechnungen sorgfältig analysiert (Interner Bericht No. 8, Projekt Systemstudien) und nach Umrechnung auf eine einheitliche Kalkulationsweise, die gesondert ausgearbeitet wurde (Interner Bericht No. 5, Projekt Systemstudien), miteinander verglichen. Für eine repräsentative Kostenrechnung wurden dann die kalkulatorischen Unsicherheiten abgeschätzt, und es wurde untersucht, inwieweit sich die derzeit noch herrschende Unsicherheit über die Erreichbarkeit wichtiger physikalischer und technischer Parameter (Plasma- β , Plasmabrenndauer, zeitintegrierte Belastung der ersten Wand Q_W) auf die Kosten auswirkt (Vortrag auf der Reaktortagung 1977). Dabei ergab sich, daß ein Nichterreichen der angenommenen Werte $\beta \approx 5\%$ und $Q_W =$

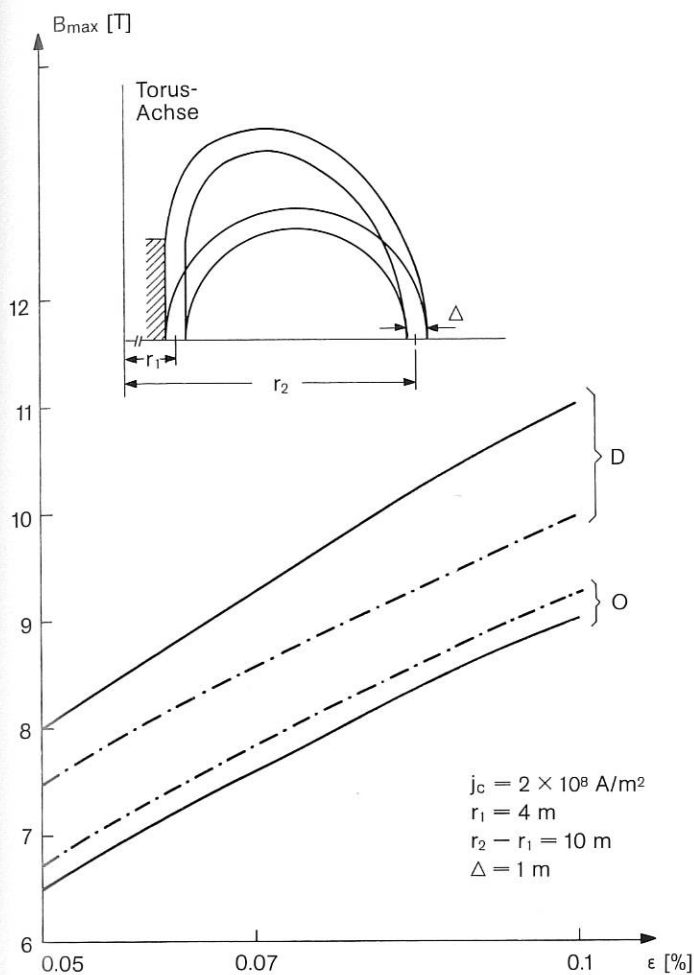


Abb. 17: Abhängigkeit des maximalen Induktionswertes B_{\max} von der zulässigen Dehnung ϵ des Wicklungsmaterials für Kreis-(O) und optimierte D-Spulen (D).

— analytisch;
 - - - nach Finite Element Rechnungen

2,5 MWa/m² mit erheblichen Kostenerhöhungen verbunden ist, daß ein Überschreiten von $\beta \approx 10\%$ und $Q_w = 2,5 \text{ MWa/m}^2$ jedoch kaum ökonomische Vorteile bringt. Diese Aussage gilt wahrscheinlich für Tokamak-Kraftwerke allgemein. Vorbehalte müssen jedoch gemacht werden, da die Kombination verschiedener Unsicherheiten (z. B. in Bezug auf β und die Plasma-brenndauer) vermutlich zu erheblichen Änderungen der Reaktorauslegung führen, denen man nur mit dem späteren Kraftwerksmodell gerecht werden kann. Außerdem könnte eine Erhöhung der zeitintegralen Wandbelastung Q_w aus nichtwirtschaftlichen Gründen (z. B. geringere Strahlenbelastung des Personals oder geringere Produktion aktivierter Materialien) wünschenswert sein.

In einer weiteren Arbeit wurden die ökonomischen und technischen Auswirkungen von neueren plasma-physikalischen Konzepten für Tokamaks (Hoch- β -Sta-

bilität und Hoch- β -Gleichgewicht, Flux-Conserving-Tokamak) und die Auswirkung von elongierten Plasma-querschnitten im Rahmen von einfachen Modellen untersucht. Die Modelle berücksichtigen reaktorge-rechte Einschränkungen wie Flußhubbedingung, maxi-male Magnetfelder, Grenzen für die thermische Lei-stung, Blanketdicke u. a. Unter Vorbehalten für die Un-sicherheit der physikalischen Annahmen zeigt sich, daß die Hoch- β -Gleichgewichte mit nahezu kreisfö-rmigem Plasmaquerschnitt keine wesentliche Verbes-serung in Bezug auf Wirtschaftlichkeitsfaktoren (spezifische Magnetfeldenergie, Leistungsdichte, spezif. Volumina) im Vergleich zum Standardreaktor (UWMAK I) bringen. Dies ist auf die schlechte Volumenausnutzung und auf die verminderte Brenndauer zurückzuführen. Starke Streckung des Plasmaquerschnitts ($b/a = 2-4$) könnte zu größeren Verbesserungen führen, falls Sta-bilität für stark elongierte Hoch- β -Gleichgewichte er-reicht werden kann.

Wegen der sich andeutenden Verminderung der er-reichbaren Plasmabrenndauer von Tokamaks gewinnen die energetischen Aspekte des Auf- und Abbaus der poloidalen Magnetfelder und der Plasmaheizung an Bedeutung. Die damit verbundenen Leistungssteige-rungen des Energieaustausches in der Aufbau- und Abbauphase erhöhen den Einfluß der Energiespeicher und der erforderlichen Leistungssteuerung (Schalter) auf Wirkungsgrad und spezifische Kosten.

Über die Bedeutung der Leistungssteuerung bei künftigen Fusionsmaschinen wurde daher auf dem „Workshop on Switching for Ohmic Heating in Fusion Devices“ (Juni 1976 in Garmisch-Partenkirchen) vor-getragen. Außerdem wurde die Berechnung der Auf- und Abbauprozesse unter Einschluß der primärsei-tigen elektrischen Schaltungen und des dynamischen Plasmaverhaltens (simuliert durch das Plasmamodell) begonnen.

5.2 Weitere reaktororientierte Arbeiten

In bisherigen Transportrechnungen wird eine sehr rudi-mentäre Form des Ohmschen Gesetzes verwendet. Insbesondere sind Terme der Form $\vec{V} \times \vec{B}$ unterdrückt. Sie sind nur vernachlässigbar klein, wenn $V_D \ll V_m$ (V_D = Diffusionsgeschwindigkeit, V_m = Diffusionsge-schwindigkeit des poloidalen Magnetfeldes). Für üb-liche Diffusionsmodelle ist aber im Reaktorbereich $V_D \gg V_m$. Zur Klärung wurden das Ohmsche Gesetz und die Diffusion in beliebigen axialsymmetrischen Systemen betrachtet / K. Borraß mit D. Pfirsch (Theo-rie) /. Eine notwendige Bedingung für stationäre dif-fusive Gleichgewichte wurde gefunden, die im wesent-lichen fordert, daß $V_D^x < V_m$ ist. V_D^x ist eine effektive Diffusionsgeschwindigkeit, deren Zusammenhang mit V_D ebenfalls untersucht wurde. Im Bereich anomaler Diffusion ist $V_D^x \ll V_D$, wenn V_D durch einen anomalen Senkrechtwiderstand verursacht wird.

Es ist $V_D^x \sim V_D$, wenn V_D durch eine anomale Elek-tronenviskosität verursacht wird. Im letzteren Fall sind die Einschränkungen der Gleichgewichtsbedingung am schärfsten. Für übliche Diffusionsgesetze („trapped ion“, Bohm) ergeben sich z. B. in diesem Fall im Reak-torbereich Maximaltemperaturen, die unterhalb der Zündtemperatur liegen.

Weiterhin findet man, daß nur, wenn $V_D^x \ll V_m$ ist, d. h. wenn Viskosität keine Rolle spielt, das Ohmsche Gesetz die erwähnte einfache Form hat. Die Frage, wie weit anomale Diffusion durch eine anomale Viskosität bestimmt wird, ist noch offen. Das heißt, daß die üblichen Transportrechnungen nur unter diesen besonderen Bedingungen gültig sind.

Ein neuer Vorschlag zur technischen Lösung des Auswechselproblems für die erste Wand bzw. das Blanket in Tokamak-Reaktoren, welcher auf einem viereckigen Querschnitt von Blanket und Abschirmung beruht, wurde konzipiert und näher untersucht / 213 /. Gegenüber anderen Konzepten liegen die Vorzüge dieser Lösung vor allem darin, daß die auszuwechselnden Teile geradlinig bewegt werden können, während alle nicht zum Auswechseln vorgesehenen Komponenten (Abschirmung, Spulen) an ihrem Ort verbleiben können.

Im Rahmen von Studien zur Plasmaheizung und von Fusionsreaktoren wurden die Heizung durch schnelle magnetische Kompression und Schlüsselprobleme der Laserlichtheizung von dichten Plasmen grob analysiert. Bei der Kompressionsheizung (Stoßwellen und adiabatische Kompression) lassen sich keine Datenkombinationen (n , T_i , β , Kompressionsverhältnis) erreichen, die für einen schnellgepulsten Reaktor geeignet wären, wenn realistische technische und physikalische Einschränkungen gemacht werden und die im Reaktor zirkulierende Energie beschränkt wird. Das Konzept der Laserlichtheizung von dichten linearen Plasmen ist aus Gründen des technischen Aufwandes und der Energiebilanz fragwürdig.

5.3 Mitarbeit am AGF-Programm „Angewandte Systemanalyse“ (ASA)

Diese Mitarbeit erforderte die Teilnahme an den Sitzungen des Programmausschusses „Energie“. Im Rahmen der Studie „Nukleare Primärenergieträger“ wur-

den nach einem kurzen Abriß von Grundlagen die Themen „Energiereserven“, „Stand der Plasmaphysik“, „Reaktorentwürfe“, „Schlüsselprobleme der Entwürfe“, „Kostenaspekte“, „Sicherheit“ und „Umweltbeeinträchtigungen“ behandelt. Unsere Studie wird auch als IPP-Bericht publiziert / IPP 4 / 147 /.

5.4 Tritiumtechnologie

Die Arbeiten am Modellexperiment zur Rückgewinnung von Tritium aus flüssigem Lithium durch eine Wirbelschicht wurden fortgeführt. Dazu wurden zunächst Messungen zur Permeation von Deuterium durch Niob bei 800°C und hohen Trägergasgeschwindigkeiten fortgeführt bzw. abgeschlossen. Bei diesen Untersuchungen wurde ein Nimonic-Gefäß verwendet, das insgesamt 6000 h lang verflüssigtes Lithium bei 600–800°C aufnahm. Mit der analytischen und metallographischen Untersuchung des Gefäßes, der Nb-Membrane und des Lithiums wurde begonnen.

Mit Beginn der Untersuchungen an einer Titan-Wirbelschicht wurde eine weitere Komponente des Modellexperimentes getestet. Als erstes Ergebnis konnte festgestellt werden, daß das Wirbelbett unter bestimmten Bedingungen als selektiver Adsorber für Wasserstoffisotope arbeitet / 238 /.

Im Laufe des Jahres 1977 wird auch Tritium in die Experimente einbezogen. Im ZTE-Erweiterungsbau wurde deshalb mit der Einrichtung eines Tritiumlabors begonnen: Ein Isotopenabzug, der über zwei parallel geschaltete Ventilatoren auch die Entlüftung des ganzen Labors sicherstellt, ist bereits installiert. Meßgeräte zur Abluft/Raumluft-Überwachung sowie ein tragbarer T-Monitor werden zur Zeit erprobt. Zur Absorption von freiwerdendem Tritium in der Raumluft oder Abluft von Pumpen oder der Glovebox wird eine halbautomatische T-Absorptionsanlage installiert. Durch diese und einige bauliche Maßnahmen (Schleuse u. ä.) müßte sichergestellt sein, die Umgangsgenehmigung für einige 10^9 Ci T zu erlangen.

Zentrale technische Einrichtungen

(Dr. Helmut Muntenbruch)

Auch im Jahre 1976 haben sich die Zentralen Technischen Einrichtungen (ZTE) kontinuierlich in der Richtung weiterentwickelt, die bei ihrer Zusammenfassung als technischer Dienstleistungsbereich im Jahre 1973 schon vorgegeben wurde. Nach mehr als drei Jahren der Arbeit ist damit auch bestätigt, daß die ursprüngliche Konzeption tragfähig war.

Mit ca. 245 Mitarbeitern wurden auch 1976 wieder für das IPP als Ganzes und vor allem für die wissenschaftlichen Projekte Dienstleistungen auf vielen Gebieten der Technik erbracht:

- *Ingenieur- und Werkstattdienstleistungen auf dem Gebiet der Elektro-, Hochspannungs- und Magnetfeldtechnik*
- *Entwicklung, Bau und Service elektronischer Geräte*
- *Ingenieur- und Werkstattdienstleistungen auf den Gebieten der Material-, der Vakuumtechnik und spezieller Fertigungstechniken (z. B. Glas- und Kunststofftechnik)*
- *Bearbeitung von Problemen der analytischen, präparativen und Elektrochemie, der Galvanik und des Umweltschutzes (Entgiftung, Schadstoffbeseitigung etc.)*
- *Konstruktion (Maschinen- und Apparatebau, Feinwerktechnik etc.)*
- *Kalkulation, Vorbereitung und Steuerung mechanischer Fertigung in internen und externen Werkstätten*
- *Fertigung von Apparaturen und Geräten in den Zentralen Mechanischen Werkstätten und der Örtlichen Werkstatt L5, Montagen großer Apparaturen im Bereich der Projekte.*
- *Bereitstellung von Halbzeugen, Bauelementen, Normteilen, Gasen etc. in Zentralen Lägern*
- *Bereitstellung, Aufbereitung, Wieder- und Weiterverwertung von Meß- und anderen Geräten und Apparaturen im Gerätepool*
- *Versorgung mit elektrischer Energie und mit strömenden Medien (Wasser, Kühlwasser, Gas etc.)*

Betrieb der Speichersysteme für elektrische Energie

Betrieb der Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage.

1. Abgrenzung des Arbeitsgebietes, Auftragsvolumen und Auftragsabwicklung

Der wachsende Bedarf an technischen Dienstleistungen machte es nötig, die Arbeiten der ZTE noch stärker als bisher auf solche zu konzentrieren, die nicht außerhalb des IPP erbracht werden konnten. Trotz wachsender Bereitschaft von Fremdfirmen zur Übernahme von Arbeiten waren weiterhin vor allem mangelnde Qualitätsgarantie, Unsicherheit von Lieferterminen, zu geringe Vertrautheit externer Fertiger und Lieferer mit spezifischen Problemen der Projekte und Kommunikationsschwierigkeiten während externer Fertigung wichtige Gründe für IPP-interne Bearbeitung der Aufträge.

Mehr als $\frac{3}{4}$ der Dienstleistungen wurde aufgrund von Aufträgen erbracht, nämlich 272018,5 Stunden. (Dabei konnte die Zahl der für Aufträge genutzten Stunden um ca. 9% gesteigert werden.) Im Rahmen der internen Betriebsabrechnung wurden diese Leistungen den Projekten in Rechnung gestellt. Für Leistungen, zu denen das IPP als Ganzes verpflichtet ist (Lehrlingsausbildung), oder die dem IPP insgesamt dienen (Gerätepool, Läger), wurden 30 907,7 Arbeitsstunden aufgewandt. Die Kosten dafür wurden auf alle Kostenträger im IPP umgelegt.

Auch im Jahre 1976 stieg der Umsatz der ZTE wiederum. Er setzte sich zusammen aus

12,4 MDM	für ca. 272 000 verrechnete Stunden
1,4 MDM	für Umlagen (Kosten von Lehrlingswerkstatt, Läger, Gerätepool)

13,8 MDM

Daß die „Umsatzsteigerung“ (ca. 8%) geringer ausfiel als die Erhöhung der Stundenzahl, ist darauf zurückzuführen, daß ab April 1976 die Stundensätze wiederum gesenkt werden konnten, und zwar von vorher DM 50,- für die Ingenieurstunde und DM 46,- für die Werkstattstunde auf einheitlich DM 45,- für die Auftragsstunde. Es gelang also – trotz Lohnerhöhungen – auch 1976 wieder, den Stundensatz nicht nur zu halten, sondern sogar um 1 bzw. 5 DM zu senken. Allerdings sind damit die Rationalisierungsreserven im wesentlichen ausgeschöpft.

2. Personelle und räumliche Entwicklung

Der geringfügige Personalzuwachs bei den ZTE (4%) beruht auf Umstrukturierungsmaßnahmen innerhalb des IPP, wie sie u. a. in einem Gutachten des Bundesrechnungshofes angeregt wurden. Die Zahl der im IPP insgesamt mit technischen Dienstleistungen beschäftigten Mitarbeiter hat sich dagegen verringert. Durch die Übernahme der Örtlichen Werkstatt L5 in die ZTE erhöhte sich die Flexibilität in der Versorgung der Projekte mit Werkstatteleistungen merklich.

Im Rahmen der Energieversorgung der Großexperimente, für die 1975 die Projektierung abgeschlossen werden konnte, wurde im Berichtsjahre das Maschinenhaus EZ 3 für den 144 MVA-Schwungradumformer im Rohbau fertiggestellt.

Die 1975 fertiggestellten Montagehallen für mechanische und elektrische Fertigung wurden von Projekten und ZTE so intensiv genutzt, daß nicht alle Benutzungswünsche erfüllt werden konnten. Durch den Umzug der Chemie in einen Neubau konnte eine ganze Zahl von Räumen für Projekte freigemacht werden und gleichzeitig die ständige Gefährdung hochwertiger Geräte anderer Arbeitsgruppen durch Chemie-Abgase beseitigt werden.

Durch den erweiterten Betrieb der Lehrwerkstatt leistete das IPP auch 1976 mehr als seinen fairen Anteil an der Ausbildung von Facharbeitern. Daneben wurden im IPP auch eine ganze Anzahl von Fachschulingenieuren während ihrer ersten und zweiten Praxissemester ausgebildet.

Typisch für die Dienstleistungen, welche die ZTE im Jahre 1976 für die Projekte erbrachten, sind diejenigen, auf die im Folgenden besonders hingewiesen wird.

3. Fachabteilung Elektro- und Hochspannungstechnik

(M. Kottmair)

Die Ingenieurgruppe (M. Kottmair) bearbeitete zusammen mit Projekten allgemeine Aufträge der Starkstromtechnik. Dazu gehören z. B. der Anschluß von PULSATOR und ASDEX an die Stoßleistungsanlage EZ2, die Stromversorgung für die Reinigungsentladung des W VII, Steuer-, Lade- und Netzgeräte für verschiedene Experimente, die Stromversorgung für die neue Galvanik.

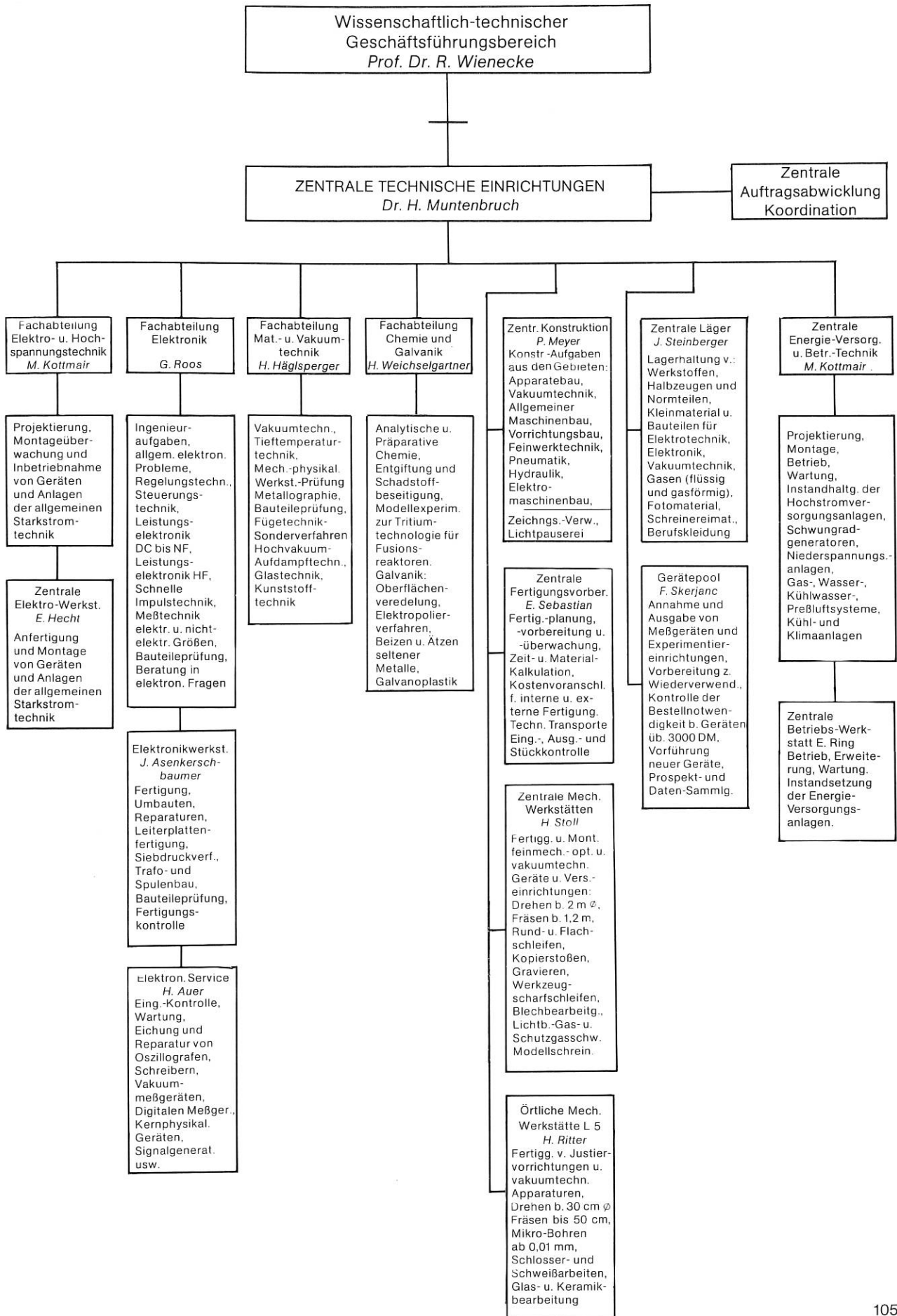
Das Ergebnis der Beteiligung an der Ausschreibung der Ladeanlagen für HBS war der Beschluß der GF, die Ladegeräte im Fall der Auftragsvergabe in der Elektrowerkstatt zu fertigen, nicht nur weil diese über die notwendige Erfahrung verfügt, sondern auch, weil sie besonders preisgünstig fertigt.

Bei der Kleinheit der Ingenieurgruppe (4 Mitarbeiter) mußten die Projekte gelegentlich erhebliche Wartezeiten in Kauf nehmen, und eine ganze Reihe von Aufträgen wurde deshalb außerhalb der ZTE bearbeitet.

Von der Elektrowerkstatt (E. Hecht) wurden von durchschnittlich 15 Mitarbeitern ca. 22000 Arbeitsstunden für 209 Aufträge geleistet. Auch 1976 mußte wieder die Hilfe von Firmen in Anspruch genommen werden, die zusätzlich ca. 4500 Arbeitsstunden aufbrachten. Trotzdem sank der Auftragsbestand nie unter die Fertigungskapazität von 2 Monaten.

Folgende Anlagen und Geräte wurden u. a. von der Elektrowerkstatt erstellt:

- Versorgungsgeräte und -anlagen für Hoch- und Niederspannung,
- Meß-, Impuls- und Energieleitungen (Fertigung und Installation),
- Spulen, Transformatoren, Drosseln usw. (Fertigung und Einbau, bzw. Anschluß),
- Vakuumsteuerung und -überwachung (Aufbau und Einbau bei W VII),



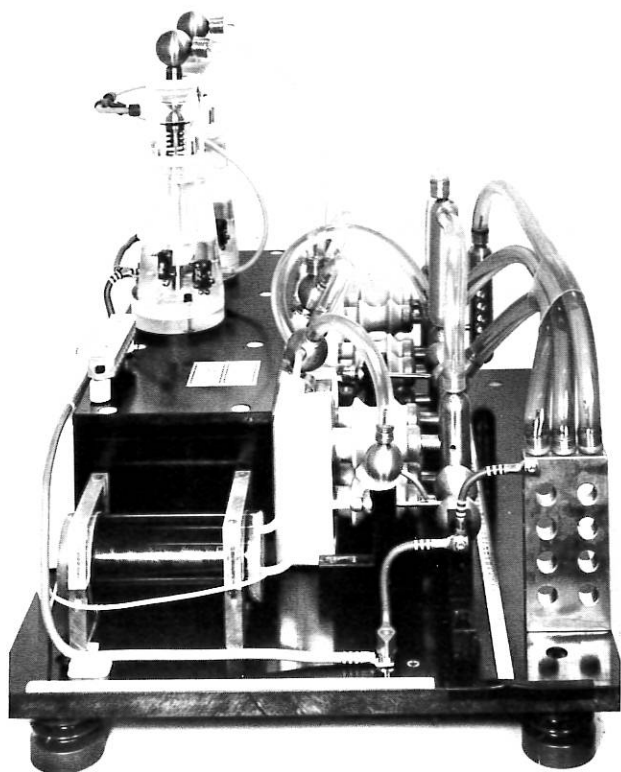


Abb. 1: Marx-Generator
3 Stufen
Nennladespannung 40 kV
Leerlaufspannung 120 kV
Kurzschlußstrom 30 kA
Energie 240 J

- Not-Aus- und Türsicherungsanlagen, Stromversorgung und Steuerung für Neutralteilchen-Einschuß Fertigung und Installation bei WVII),
- Kondensatorbatterien, einschl. Steuerung und Ladeanlage für Hochleistungslaser (für Projektgruppe Laserforschung).

4. Fachabteilung Elektronik

(G. Roos, W. Melkus)

Der in den Vorjahren beobachtete Trend zur Entwicklung elektronischer Steuerungen als Teil des Aufgabengebietes der FA setzte sich fort. Die meisten der 1976 von der Ingenieurgruppe entwickelten und von der Zentralen Elektronikwerkstatt gebauten Geräte gehören zu diesem Gebiet. Erwähnenswert ist, daß diese Entwicklungsarbeiten sich auch in die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Plasmaphysik einfügten. So wurde im Zusammenhang mit der Lieferung von Ionenquellen aus Culham/England an verschiedene Forschungsinstitute ein großer Teil der dafür benötigten Steuer- und Regelgeräte im IPP entwickelt und angefertigt. Diese Arbeiten werden auch im Jahre 1977 fortgesetzt.

Ein anderer Teil der Aufgaben betraf die Abänderung bzw. Ergänzung verschiedener, von der Industrie gelieferter Geräte für die speziellen Anforderungen des Experimentierbetriebs im IPP.

Die folgenden Entwicklungsarbeiten der Ingenieurgruppe sind wegen der allgemeinen Anwendbarkeit bzw. ihrer Wichtigkeit besonders hervorzuheben:

- Stromprogrammgeber:

Veranlaßt durch ähnliche Aufträge aus verschiedenen Bereichen wurde ein universeller, mehrkanaliger Steuerprogrammgeber (5 oder 6 Kanäle) entwickelt, der weite Zeitbereiche überstreicht und beliebig erweiterbar ist. In einem Programmierfeld sind pro Kanal 2 unabhängige Triggereingänge, sowie Pulse-, Gate- und Inhibit-Ausgänge vorgesehen, die miteinander und mit fremden Signalgebern bzw. -empfängern verknüpft werden können. Damit ist man in der Lage, im Rahmen der verfügbaren Kanäle auch komplexe Steuerprogramme zu realisieren. Normalerweise gehen die Zeitbereiche über 4 Zehnerpotenzen; sie können je nach Bedarf von μs bis 10 min angesiedelt werden. Wie allgemein, so wurde auch hier auf die speziellen Probleme der Plasmaphysik hinsichtlich Störsicherheit besonderes Gewicht gelegt.

- Programmierte Kühlung der Prototyp-Hauptfeldspulen für ASDEX

Die Hauptfeldspulen für ASDEX sind wegen ihrer großen Abmessungen empfindlich gegenüber ungleichmäßiger oder zu rascher Abkühlung bei jedem einzelnen Arbeitsspiel; sie dürfen deshalb nur programmiert abgekühlt werden.

Bei der Prüfung einer ASDEX-Prototypspule sollte diese u. a. einer großen Zahl von Temperaturzyklen unterworfen werden. Zu diesem Zweck wurde in Zusammenarbeit mit dem ASDEX-Team eine Steuerung entworfen, die zwar sehr einfach aufgebaut ist, jedoch genau den Funktionen der für den späteren Betrieb vorgesehenen Anlagen entspricht. Es wurden dabei alle relevanten Parameter bis hin zum großen Schwungradgenerator mit einbezogen. Mit dieser Apparatur konnte neben der Spule auch das Verhalten des endgültigen Steuer- und Regelsystems getestet werden.

Bei der Konzeption des Steuersystems wurde durch erhöhte Redundanz und entsprechende Verriegelungen auch dafür gesorgt, daß unter keinen Umständen Schäden an den Spulen auftreten können.

Der Zentrale Elektronikservice (H. Auer) führte während dieses Jahres 926 Reparaturen und 234 Eingangsprüfungen durch. Hierfür wurden 4126 Arbeitsstunden aufgewandt und für 15000 DM Ersatzteile eingebaut.

Während die Gesamtzahl der Aufträge gegenüber dem Vorjahre nahezu konstant blieb (-31), nahmen die Eingangsprüfungen um ca. 25% ab.

Die Zentrale Elektronikwerkstatt (J. Asenkerschbaumer) fertigte - wie in den früheren Jahren - zahlreiche Geräte in analoger und digitaler Technik für Steuer- und Regelsysteme, Impulstechnik, Stromversorgungen, Meßsysteme usw. Darüber hinaus wur-

den viele Transformatoren und Spulen (z. T. als Ersatz für defekte Einheiten) hergestellt.

Die Erweiterung der Platinenfertigung und der zugehörigen fototechnischen Anlagen wurde abgeschlossen, so daß nunmehr mit der Herstellung von durchmetallisierten Leiterplatten begonnen werden konnte. Auch die für die gesamten Aufträge notwendigen mechanischen Arbeiten wurden zumeist von der Elektronikwerkstatt selbst ausgeführt.

Insgesamt wurden 264 Aufträge bearbeitet und dabei von elf Facharbeitern 13974 effektive Arbeitsstunden geleistet.

5. Fachabteilung Material- und Vakuumtechnik

(H. Häglsperger)

Im Berichtsjahre wurden insgesamt 777 Aufträge bearbeitet. Erwähnenswert sind davon:

- Umfangreiche Konstruktions- und Laborarbeiten, sowie Tests für die Herstellung der Isolierrahmen zum ASDEX-Vakuumpfäß (Betriebstemperatur bis 150°C unter Hochvakuumbedingungen) aus Polyimidteilen mittels eines dazu entwickelten kombinierten Klebe-Gieß-Verfahrens.
- Entwicklung und Fertigung von unmagnetischen Metall-Keramik-Verbindungen für N₂-Flüssiggasleitungen des ASDEX-Divertorpumpensystems mit hoher Thermoschockbeständigkeit. Arbeitsdruck max. 11 Bar bei 80°K. Reibschweißverbindungen der Paarung Edelstahl-AlMg₃ für die gleichen Betriebsbedingungen. Diese Arbeiten wurden zusammen mit der Fa. MAN – Neue Technologien durchgeführt.
- Ausarbeitung eines „Blind-Gießverfahrens“ zum Ausgießen der, zwischen den ASDEX-Hauptfeldspulen und dem zentralen Stützkörper vorhandenen, im Montageendzustand jedoch nicht mehr zugänglichen Hohlräume mit Epoxidharz, sowie Erprobung des Verfahrens am 1 : 1-Modell.
- Innenbedampfung von 25 Rotationsellipsoiden für Cerenkov-Zähler (CERN) mit einer schwach transparenten Al-Schicht. Die geforderte Gleichmäßigkeit der Schichtdicke konnte durch partielles Abschatten entsprechender Bereiche realisiert werden.
- Versuche zur Herstellung von Ti-Verdampfern mit großem Ti-Vorrat durch mehrfach zonenweises Niederschmelzen von Ti-Draht auf Ta-Trägerstäben, die mit Mo-Wendeln versehen waren, mittels induktiver Durchlauferhitzung unter Schutzgas.
- Anfertigung kompletter Entladungsröhre für CO- und CO₂-Laser unter Anwendung unterschiedlichster Technologien im Rahmen der Weiterentwicklung von chemischen Lasersystemen.
- Bearbeitung von Problemen zur Isolation von Leiterverbindungen bzw. Spulenverschaltungen an ASDEX-Komponenten, sowie die Anfertigung von Prüflingen für elektrische Spannungstests.

- Materialuntersuchungen mit Hilfe mech. phys. Prüfverfahren, metallographischer Arbeitsmethoden sowie zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Ermittlung von Festigkeitswerten, zur Güteprüfung bei Fügeverfahren sowie zur Untersuchung von Schadensfällen.

Im Berichtsjahre wurde in den Labors der FA eine Mittelfrequenz-Löteinrichtung 10 kHz/200 kW installiert, deren Leistung eine rasche induktive Erwärmung speziell von Cu.-Werkstücken großen Querschnitts, z. B. bei der Durchführung von Hartlötprozessen, ermöglicht. Die Anlage gestattet (abweichend von Standardausführungen) ferner, den Induktor bis zu genügend großem Abstand von der Anlage lagenunabhängig zu betreiben und somit schwer zugängliche Stellen zu erreichen.

6. Fachabteilung Chemie und Galvanik

(H. Weichselgartner)

Im Jahre 1976 konnten die im Erweiterungsbau der ZTE fertiggestellten Werkstätten und Labors bezogen werden. Die Galvanik verfügt nun über Einrichtungen, die es ermöglichen, praktisch alle Verfahren der Oberflächentechnik auszuführen. Auch große Bauteile, Kessel oder Rohre können nun in den Räumen galvanisiert, gebeizt, entfettet oder elektropoliert werden.

Trotz der Beeinträchtigungen durch den Umzug und die damit verbundenen Produktionspausen konnten von der Fachabteilung wiederum rund 1100 Aufträge bearbeitet werden.

Besonders erwähnenswert davon sind:

- Experimentelle Beiträge zur Tritiumtechnologie (siehe Systemstudien),
- Analytische Untersuchungen konventioneller Art, mittels Atomabsorption (AAS) und Gaschromatographie (GC), wie beispielsweise
 - a) Bestimmung des beim Betrieb des OH-Schalters (für W VIIa) freigewordenen Wasserstoffes (GC),
 - b) Quantitative Wasserbestimmung in Ar (GC),
 - c) Bestimmung der Zusammensetzung elektrochemisch aufgebrachtener Legierungen (AAS),
 - d) Quantitative Kühlwasseranalyse (im Auftrag von W VIIa) auf O₂, N₂H₄, Cl⁻, SO₄²⁻, Cu, Fe, Härte (Konv. + AAS),
- Präparative Arbeiten für den Jodlaser,
- Beseitigung von Schadstoffen und Regenerierung von Chemikalien sowie Wiedergewinnung von Wertstoffen. So wurden beispielsweise aus ca. 3,5 t verbrauchter Fotochemikalien fast 1,5 kg Silber und 230 kg Reduktionsmittel wiedergewonnen und weiterverwendet.
- Anwendung elektrochemischer Verfahren zur Herstellung von Bauteilen auf galvanoplastischem Wege oder mit Hilfe von Foto-Ätz-Verfahren, z. B. für Bolometermasken.

Außerdem hat diese Fachabteilung in Ausführung der Verordnungen zur Sicherheit am Arbeitsplatz die Sicherheitsbelehrung aller Mitarbeiter der ZTE durchgeführt.

7. Zentrale Konstruktion

(P. Meyer)

Der größte Teil der Konstruktionskapazität der Zentralen Konstruktion wurde 1976 vom Projekt ASDEX beansprucht. Dem steigenden Bedarf an Konstrukteuren stand etwa im gleichen Umfang ein sinkender Bedarf beim Projekt W VIIa gegenüber. Trotz Anwachsens der Mitarbeiterzahl von 18 auf 21 mußte wieder eine Reihe von Konstruktionsaufgaben an externe Konstruktionsbüros vergeben werden.

Die Arbeiten am „Gefäß“ für das Projekt ASDEX konnten im Laufe des Jahres abgeschlossen werden. Die Arbeiten an den anderen wesentlichen Komponenten – mit Ausnahme der Diagnostikeinrichtungen – sind soweit fortgeschritten, daß nur noch Detailkonstruktionen auszuführen sind.

Die Konstruktionsarbeiten am Stellarator W VII A betrafen die Neutralinjektion, Diagnostik- und Überwachungseinrichtungen und Hilfseinrichtungen für den experimentellen Betrieb.

Für das Projekt HBS II wurden das Gerüst für die Bühne, die Power-Crowbar-Batterie und verschiedene

Montagevorrichtungen konstruiert, sowie die Fertigungszeichnungen für die Rohr-Funkenstrecke erstellt.

Die Konstruktionsarbeiten am PML-Torus konnten mit der Konstruktion verschiedener Schweiß-, Löt- und Bearbeitungsvorrichtungen beendet werden.

Das Projekt Plasma-Wand-Wechselwirkung erforderte weiterhin Konstruktionsarbeiten für Ergänzungen und Erweiterungen bestehender Anlagen und für ein neues Beschleunigerfundament.

8. Zentrale Fertigungsvorbereitungen

(E. Sebastian)

Die Zahl der für die Zentralen Mechanischen Werkstätten vorbereiteten Aufträge (930) unterschritt 1976 erstmals die 1000-Stück-Grenze. Da dabei aber die Gesamtzahl der Auftragsstunden zunahm, wird gleichzeitig die Zunahme der Auftragsgröße sichtbar. Ihr Durchschnittswert stieg auf 100 Std. an. Etwa 10% der Aufträge beanspruchten dabei nahezu 50% der Fertigungszeit.

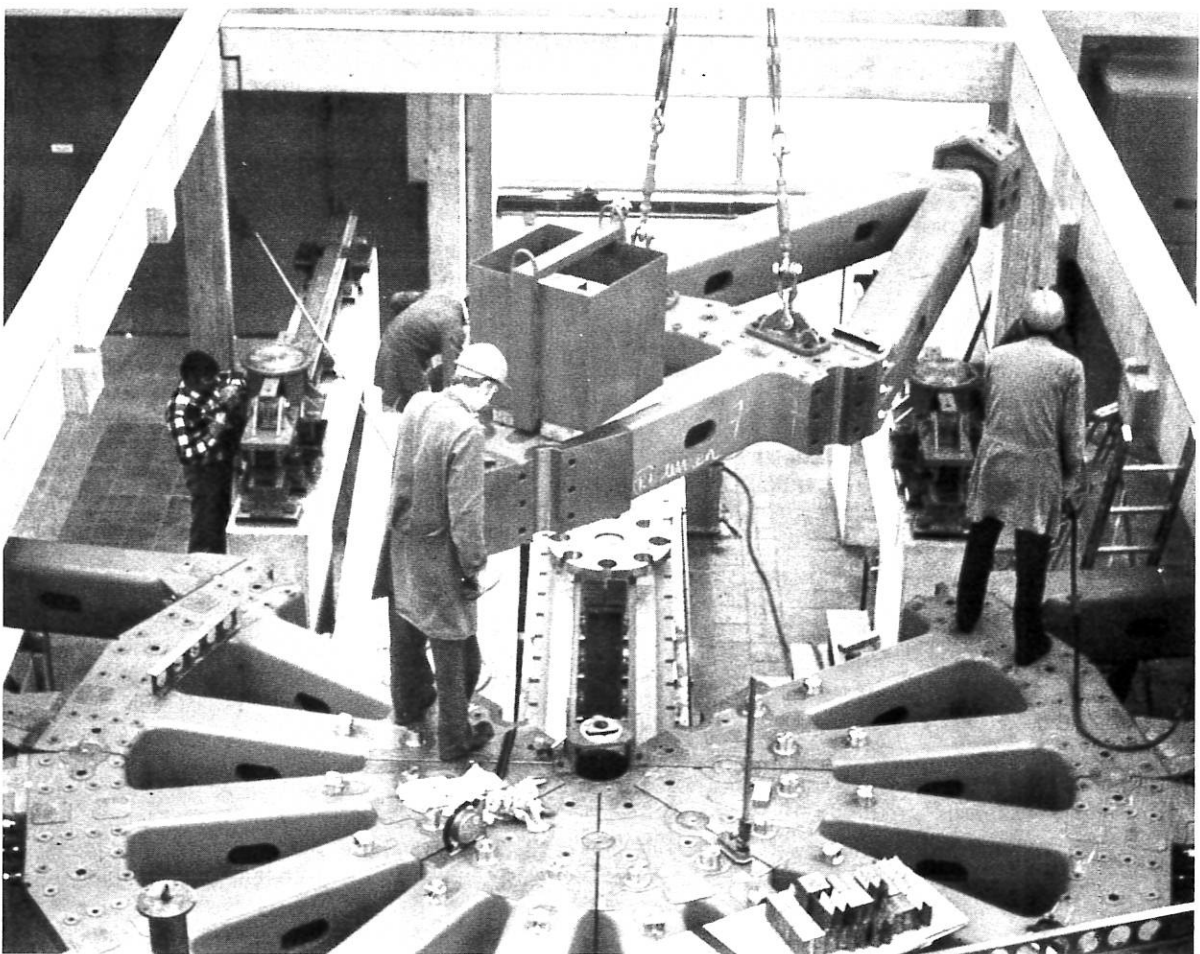


Abb. 2: Ein Sektor der unteren Scheibe des ASDEX-Gerüsts wird montiert; vor der Absenkung in die Originalposition muß er in angehobenem Zustand horizontal ausgerichtet werden. Die genaue Platzierung während der verschiedenen Montagephasen erfordert ein eingespieltes Montageteam. (Gewicht eines Sektors: 4 t)

Die ebenfalls von der AV gesteuerten Montagearbeiten außerhalb der Zentralen Mechanischen Werkstätten nahmen um 50% zu und machen nun schon 15% der geleisteten Gesamtstunden aus. 165 der Aufträge betrafen Schreinerarbeiten. Erwähnenswert ist, daß der Trend zu (großen) Aufträgen mit kurzen Terminen geht.

An externe Auftragnehmer wurden über die Arbeitsvorbereitung 32 Aufträge mit insges. 6000 Stunden vergeben. Dabei handelte es sich vorwiegend um Aufträge mit hohen Stückzahlen (Serien).

Außer der üblichen Vorbereitung und Überwachung von Aufträgen wurden wieder für größere Fertigungsaufträge Kostenvoranschläge mit einem Gesamtwert von 650.000,- DM erarbeitet. Außerdem machte die Arbeitsvorbereitung Vorausschätzungen (zum Teil nach im Entwurf befindlichen Unterlagen) mit einem Umfang von ca. 4,5 MDM.

Zwischen- und Endkontrollen der im IPP gefertigten Teile und Apparaturen wurden ebenso durchgeführt wie Eingangskontrollen der von Fremdfertigern gelieferten Stücke.

9. Zentrale Mechanische Werkstätten

(H. Stoll)

In den Zentralen Mechanischen Werkstätten wurden 1976 von

Facharbeitern	ca. 92.000 Produktionsstunden
Auszubildenden	ca. 3.000 Produktionsstunden

insgesamt also ca. 95.000 Produktionsstunden erbracht. Der Personalstand erhöhte sich bei acht Zugängen und sechs Abgängen von 100 Mitarbeitern auf 102 Mitarbeiter.

In der Schlosserei (J. Glock) hat sich die Entwicklung zum verstärkten Montage-Einsatz von Mitarbeitern außerhalb der ZW fortgesetzt. Im 1. Halbjahr hielten sich Montage-Aufträge und Aufträge, die in der Werkstätte ausgeführt werden konnten, noch nahezu die Waage. Mitte des Jahres kam zu den bereits laufenden Montage-Arbeiten die ASDEX-Gerüstmontage hinzu. Dies hatte zur Folge, daß bis zum Jahresende ca. 75% des Personals der Schlosserei ständig für Montage-Aufgaben eingesetzt werden mußten.



Abb. 3:
Kreuzstück für PML-Torus:
Das Werkstück ist zum
Ausschlagen eines Zentrier-
durchmessers, der für die
Weiterbearbeitung auf
einer Drehmaschine
erforderlich ist, auf einem
„Deckel“-Universal-Fräs- und
Bohrwerk der Type FP3L
aufgespannt . . .

Es vollzieht sich aber nicht nur ein Wandel zu verstärkter Montagetätigkeit hin, sondern die stetig wachsenden Experiment-Abmessungen führen auch zu einer Änderung der Anforderungen an die Monteure, die sich nun von der Handhabung kleinerer Werkstücke auf die von Werkstücken bis zu 10 t (ASDEX-Spulen) umstellen müssen. Solche Montagearbeiten sind in den Arbeitsbereich des Schwermaschinen-Baues einzureihen.

Auch aus der Mechanik (*J. Müller, H. Maisch*) wurden Mitarbeiter vom ersten Halbjahr an verstärkt zum Aufbau von Experimentier-Anordnungen außerhalb des Werkstattbereichs herangezogen (W VII A). Für den Bereich Oberflächenphysik wurde ab Jahresmitte für die Experimente QWASS und BOMBARDON eine starke Montagegruppe zur Verfügung gestellt.

Die spanabhebende Fertigung wurde vom zweiten Halbjahr an durch terminlich eng begrenzte Großaufträge des Projektes ASDEX bestimmt, die zeitweise bis zu 75% der Kapazität in Anspruch nahmen.

Auch in der Feinmechanik (*R. Singer*) waren im Jahresdurchschnitt 20% der an den Werkbänken beschäftigten Mitarbeiter für Montagearbeiten abgestellt. Erst das zweite Halbjahr brachte verstärkt feinmechanische Aufträge, z. B. für Diagnostikgeräte, die dem eigentlichen Charakter der Werkstätte entsprechen.

Wie in den vergangenen Jahren, so verließen auch diesmal wieder im Februar fünf junge Facharbeiter nach erfolgreicher Abschlußprüfung die Lehrwerkstatt (*G. Knoll*) zur weiteren Beschäftigung in den Zentralen Mechanischen Werkstätten. Im März wurde die vom Berufsbildungsgesetz vorgeschriebene Zwischenprüfung des 2. Ausbildungsjahres durchgeführt, und für 28 Lehrstellenbewerber fand die Aufnahmeprüfung statt. Die 6 nach einem im IPP entwickelten Verfahren ausgewählten Bewerber begannen am 1. September ihre Ausbildung zum Feinmechaniker.

In der Schreinerei (*W. Kaehs*) wurde nach der Fertigstellung des Gesamtmodells ASDEX eine Reihe von kleineren Modellen für die Experimente ASDEX, HBS und PML angefertigt. Die Fertigstellung des Stellarators W VII A und der Aufbau des Tokamaks ASDEX erforderte in erheblichem Umfang Schreinerarbeiten für Einbauten, Vorrichtungen und spezielle Gerüstteile. Metall- und Kunststoffbearbeitung in der Schreinerei nahmen ca. 20% ihrer Kapazität in Anspruch.

Die Ausstattung der Zentralen Mechanischen Werkstätten wurde weiterhin an die Fertigungsaufgaben angepaßt, so durch die Beschaffung einer modernen Schutzgasschweißanlage und den Ersatz von zwei kleineren Maschinen durch eine VDF-Hochleistungs-drehmaschine (mit einem Drehdurchmesser bis zu 480 mm).

10. Örtliche Werkstatt L 5

(*H. Ritter*)

Die Örtliche Werkstatt L 5 wurde zum Jahresbeginn in die ZTE integriert. Durch die Bereichsunabhängigkeit konnte sie flexibler reagieren und Arbeiten für Projekte in verschiedenen Bereichen ausführen. Von den insgesamt 8700 Produktionsstunden wurden für Projekte außerhalb des direkten Einzugsbereichs der Werkstatt geleistet:

532 Stunden für W VII	(Bereich 2)
78 Stunden für PWW	(Bereich N)
66 Stunden für ASDEX	(Bereich 3)
17 Stunden für ZTE	
397 Stunden für Laser Pellet	(Bereich T)
266 Stunden für Externe	

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag weiterhin bei der Bearbeitung von Aufträgen der Projektgruppe Laserforschung, die ein besonders enges Zusammenwirken zwischen Projekt und Werkstatt erforderten. Viele dieser Arbeiten erforderten hohe Präzision.

Die Personalfuktuation war bei einer durchschnittlichen Mitarbeiterzahl 9 minimal: Ein Mitarbeiter wechselte von der Werkstatt in eine Projektgruppe über. Für ihn trat ein anderer Facharbeiter von der ZW in die ÖW über.

11. Zentrale Läger

(*J. Steinberger*)

Die Zentralen Läger lieferten im Berichtsjahre Materialien und Bauteile für ca. 2.5 Mio DM. Die Umsatz-erhöhung gegenüber dem Vorjahr (ca. 25%) ergab sich nicht nur durch Preissteigerungen sondern auch durch den wachsenden Bedarf der Projekte.

Vom Materiallager wurden vor allem die zentralen und örtlichen Werkstätten, aber auch die Projekte mit Halbzeugen, Normteilen usw. im Werte von ca. 450.000,- DM beliefert. Die Entnahmen gingen also um 10% zurück.

Das Elektro-, Elektronik- und Vakuumlager versorgte die Projekte und Werkstätten mit Bauteilen und Geräten im Werte von ca. 1.3 Mio DM aus einem Sortiment von mehr als 4000 verschiedenen Artikeln. Hier ist eine Steigerung der Entnahmen gegenüber dem Vorjahr um ungefähr 10% zu verzeichnen.

Das Gaslager stellte technische, reinste und flüssige Gase, sowie exotische Gasmischungen im Werte von DM 400.000,- den einzelnen Projekten zur Verfügung und zeichnete sich durch eine besonders große Umschlaghäufigkeit (47) aus.

Das Filmlager versorgte die einzelnen Projekte für ihre Versuche mit Spezialfilmen (ca. 120.000 Aufnahmen) im Werte von 240.000,- DM.

Das Holzlager wurde erst 1976 in die zentralen Läger eingegliedert. Für die Aufträge der Projekte wurde in diesem Jahr Holz der verschiedensten Abmessungen, Sorten und Qualitäten im Werte von DM 46.000,- verbraucht.

12. Gerätepool

(F. Skerjanc)

Im Gerätepool gingen Materialien mit einem Einkaufswert von insgesamt DM 2.183.485,- ein. Dieser Wert entspricht etwa dem des Vorjahres (+10%). Darunter waren funktionsfähige, reparaturbedürftige und verschrottungsfähige Geräte, sowie Kleinmaterial.

Aus den Beständen des Gerätepools wurden

– ausgegeben an Projekte im IPP: Geräte im Einkaufswert von	DM 714.932
– ausgegeben an Projekte im IPP: Bauteile im Wert von	DM 81.490
– verliehen an fremde Institute: Geräte im Einkaufswert von	DM 620.000
– verkauft an Auswärtige: Geräte und Bauteile im Verkaufswert von	DM 20.114
– verkauft an Händler: Schrott im Verkaufswert von	DM 1.706
Zusammen: DM 1.438.242	

Die Zahl der Mitarbeiter im Gerätepool hat sich in der zweiten Jahreshälfte auf 3 erhöht. Damit können nun Aufgaben der Geräteverwaltung in Angriff genommen werden, die seit längerem geplant waren. Unter den 4551 geleisteten Arbeitsstunden waren 933 Stunden (ca. 20%), die für die zentralen Läger aufgewandt wurden.

13. Energieversorgung und Betriebstechnik

(M. Kottmair, E. Ring)

Schon 1975 stieg der Energiebedarf der Experimente erheblich, und zur Reduzierung des Spitzenbedarfs wurden die Nutzungszeiten der Stoßgeneratoren über die reguläre Dienstzeit hinaus ausgedehnt. Den zusätzlichen Anforderungen entsprechend, erhöhte sich 1976 die Zahl der Mitarbeiter der Betriebsgruppe um 3 auf 19. Von ihnen wurden vielfältige Routineaufgaben und solche auf folgenden Gebieten erledigt:

Erweiterung der Energieversorgung,
Thyristoranlagen L5E

Nach Abschluß der Bauarbeiten (Ausbau der Räume in L5E für Stromrichtergeräte, Drosseln, Schalter und Kreuzschienenverteiler, sowie Fundament-Erstellung für die Stromrichtertransformatoren) konnte im Herbst

1976 die Montage der ersten beiden Stromrichteranlagen planmäßig beginnen. Die Drehstromkabel zum Anschluß der Anlagen an den Umformer EZ2 (später EZ3) und die Gleichstromkabel zwischen L5E und den Laborhallen L6 und L7 wurden verlegt. Nach Fertigstellung des Entwurfs für die Anlagensteuerung erfolgten Ausschreibung und Bestellung des Kreuzschienenverteilers.

Umbau der Hg-Gleichrichteranlage in L5E
Der Betrieb der OH-Transformatoren von W VII und ASDEX erfordert Umkehr der Stromrichtung während des Pulses. Stromumkehr war jedoch mit den bestehenden Hg-Anlagen in L5E nicht möglich. Durch Umbau in Antiparallelschaltung konnten die Hg-Anlagen 1–7 für den Betrieb mit Stromwendung erweitert werden.

Rückkühlanlage

Die seit vielen Jahren ununterbrochen betriebene Rückkühlanlage bedarf der Erneuerung. Außerdem ist ihre Anpassung an den inzwischen erheblich angewachsenen Kühlwasserbedarf erforderlich. Die Projektierung der neuen Rückkühlanlage, die – im Gegensatz zur bisherigen – auch parallel mit der Anlage für EZ2 arbeiten wird, ist abgeschlossen; neue Kühltürme sind in Auftrag gegeben.

Revision der Maschinensätze

Die 15 MJ-Umformanlage in EZ1 wurde nach ca. 5000 Betriebsstunden (seit der letzten Revision) demontiert und überprüft. Einige geringfügige Mängel waren zu beheben.

Die 1,45 GJ-Anlage wurde nach ca. 2000 Betriebsstunden ebenfalls revidiert. Die Ultraschallprüfung des Schwungrades ergab keine Veränderung. Der Antriebsmotor wurde zur Überprüfung des Läufers, an dem im Frühjahr einige lose Bleche im Zahnkopfbereich des Blechpaketes verklebt werden mußten, demontiert. Auch hier konnten keine Veränderungen an den Klebstellen festgestellt werden.

Allgemeine Aufträge

Für Betrieb, Unterhalt und Erweiterung der allgemeinen Betriebsanlagen des Instituts und der Versorgungsanlagen der einzelnen Experimente wurden 1976 von der Gruppe Betriebstechnik 206 Aufträge bearbeitet. Die Mitarbeiter leisteten hierzu ca. 27.000 Arbeitsstunden. Zur Überwindung von Engpässen mußte auch fremde Hilfe in Anspruch genommen werden.

Organisationsstruktur des



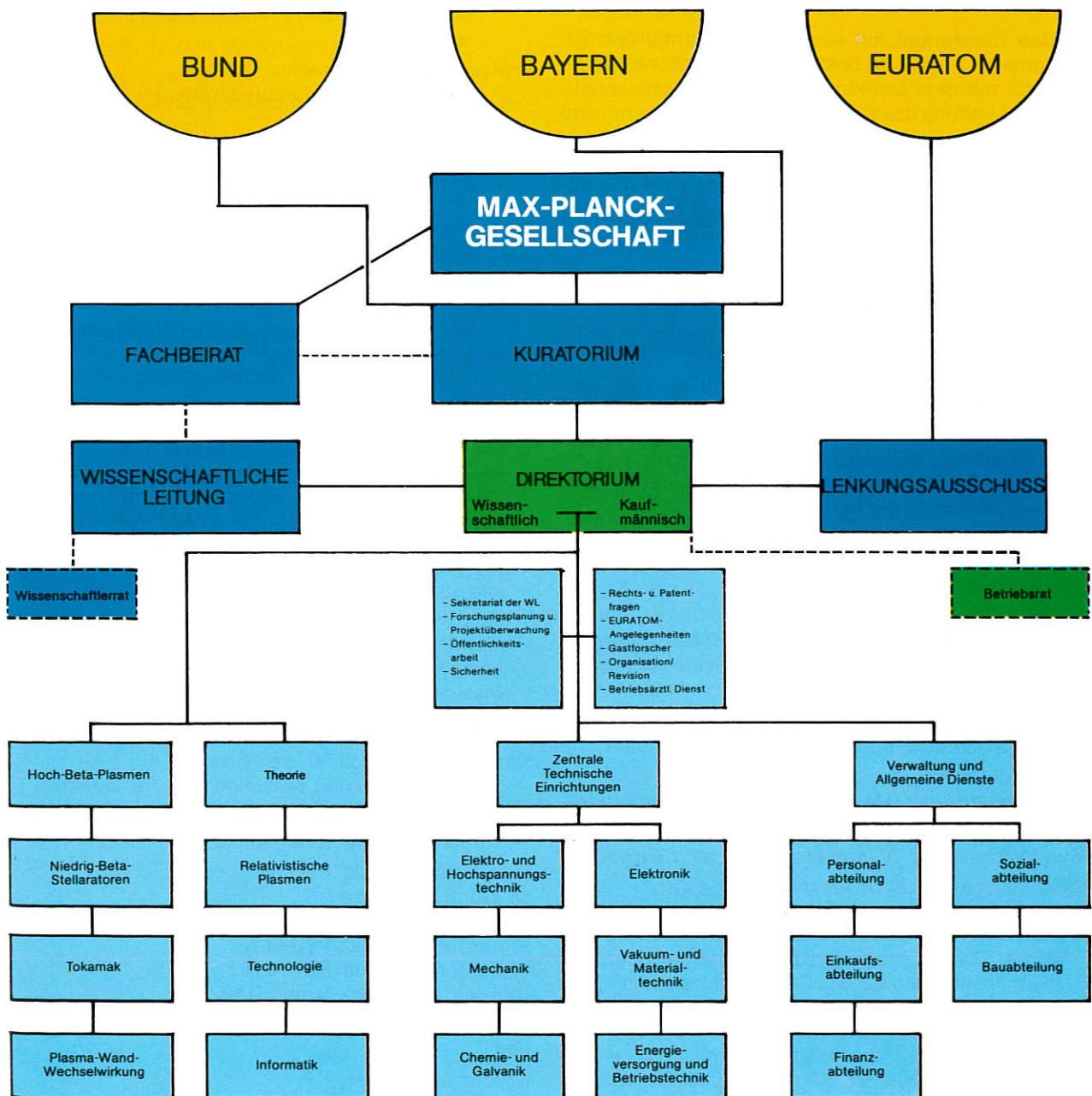
Der organisatorische Aufbau des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik

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.

Im Rahmen einer zum 1. Juli 1976 in Kraft getretenen Satzungsänderung wurde die aus zwei Mitgliedern bestehende Geschäftsführung durch ein mehrköpfiges Direktorium ersetzt und die bisherige Zuständigkeitsverteilung innerhalb des Instituts verändert.

Der organisatorische Aufbau des IPP stellt sich schematisch folgendermaßen dar:



Der organisatorische Aufbau des Instituts:

1. Die Max-Planck-Gesellschaft als **Trägerorganisation** erläßt die Institutssatzung, beruft die Wissenschaftlichen Mitglieder, die Mitglieder des Kuratoriums und des Fachbeirats, bestellt die Mitglieder des Direktoriums, überprüft die ihr satzungsgemäß zu erstattenden Berichte und wirkt im Kuratorium mit.
2. **Finanzierungsträger** des Instituts sind
 - die Bundesrepublik, die etwa 63% des Zuschußbedarfs deckt,
 - der Freistaat Bayern, der etwa 7% beiträgt,
 - die Europäischen Gemeinschaften (EURATOM), die 25% der Grundfinanzierung übernehmen und bestimmte Investitionen bis zu 40% fördern.
3. **Das Kuratorium** hat eine unterstützende und allgemeine Aufsichts- und Entscheidungsfunktion. Es berät mit dem Direktorium und der Wissenschaftlichen Leitung das wissenschaftliche Programm und die daraus sich ergebenden Folgen für den Haushaltsplan. 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 waren im Jahre 1976:
Professor Dr. Reimar Lüst,
als Präsident der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V.;
Ministerialdirektor Dr. Günter Lehr bis zum 14. Oktober; danach
Ministerialdirigent Dr. Wolf-J. Schmidt-Küster, als vom Bundesminister für Forschung und Technologie entsandter Vertreter;
Ministerialdirigent Hugo Eick-Kerssenbrock, als vom Bundesminister der Finanzen entsandter Vertreter;
Ministerialdirektor Dr. Albert Reuter,
Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus, als vom Freistaat Bayern entsandter Vertreter;
Dr. Klaus Dohrn,
Schatzmeister der Max-Planck-Gesellschaft;
Professor Dr. Werner Heisenberg,
Senator der Max-Planck-Gesellschaft, verstorben am 1. Februar 1976; ab 12. Juli 1976
Bundesminister a. D. Professor Dr. Hans Leussink;
Generaldirektor a. D. Dr. Alexander Hocker.
4. Zur Beratung des Instituts in allen wissenschaftlichen Fragen wurde ein **Fachbeirat** gebildet, der dem Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft jährlich einen Bericht über die wissenschaftliche Arbeit des Instituts erstattet und diesen zugleich dem Kuratorium und der Wissenschaftlichen Leitung des Instituts zuleitet. Mitglieder des Fachbeirats waren im Jahre 1976:

- Professor Dr. Roy W. Gould (Vorsitzender),
California Institute of Technology, Pasadena, USA;
- Professor Dr. Bo Lehnert (stellvertretender Vorsitzender),
The Royal Institute of Technology, Division of Plasma Physics and Fusion Research, Stockholm, Schweden;
- Professor Dr. Ludwig Biermann,
Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, München;
- Professor Dr. Xaver Eder,
Bayerische Akademie der Wissenschaften, Institut für Tieftemperaturforschung, Garching;
- Professor Dr. Dieter Kind,
Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik der Technischen Universität Braunschweig;
- Professor Dr. Hans-Joachim Kunze,
Institut für Experimentalphysik der Ruhr-Universität Bochum;
- Professor Dr.-Ing. Günther Lehner,
Institut für Theorie der Elektrotechnik der Universität Stuttgart;
- Professor Dr. Werner Schilling,
Institut für Festkörperforschung der Kernforschungsanlage Jülich GmbH;
- Professor Dr. François Waelbroeck,
Institut für Plasmaphysik der Kernforschungsanlage Jülich GmbH.
5. **Die Wissenschaftliche Leitung** des IPP, die aus den ständig im Institut tätigen Wissenschaftlichen Mitgliedern mit Leitungsfunktion besteht, stellt das Forschungsprogramm auf und beschließt den Zeit-, Personal- und Finanzrahmen der durchzuführenden Forschungsaufgaben, die Organisationsstruktur des wissenschaftlichen Bereiches, die Beauftragung von Wissenschaftlern mit Leitungsaufgaben und im Zusammenwirken mit dem Direktorium die Anstellung, Eingruppierung und Entlassung des wissenschaftlichen Personals. Ihr gehörten im Berichtsjahr 1976 an:
Professor Dr. Rudolf Wienecke,
als Vorsitzter und Wissenschaftlicher Direktor;
Dr. Gerhart von Gierke,
als 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.

6. Der bis zum 1. 7. 1976 bestehenden **Geschäftsführung** gehörten an:

Professor Dr. Rudolf Wienecke,
wissenschaftlich-technischer Geschäftsführungsbereich;

Dr. jur. Ernst-Joachim Meusel,
kaufmännisch-administrativer Geschäftsführungsbereich.

Dem anschließend gebildeten **Direktorium**, das die laufenden Geschäfte besorgt, über die Verwendung der Haushaltsmittel entscheidet, den Ablauf der Forschungsarbeiten überwacht und regelt, im Einvernehmen mit der Wissenschaftlichen Leitung über die Anstellung, Eingruppierung und Entlassung des wissenschaftlichen Personals beschließt und das Institut nach innen und außen vertritt, gehörten folgende Mitglieder an:

Professor Dr. Rudolf Wienecke,

Dr. Gerhart von Gierke,
wissenschaftlich-technischer Geschäftsführungsbereich;

Dr. jur. Ernst-Joachim Meusel,
kaufmännisch-administrativer Geschäftsführungsbereich.

7. Der nach dem Assoziationsvertrag mit EURATOM gebildete **Lenkungsausschuß**, dem Vertreter der Kommission und des IPP angehören, hat weitgehende Zuständigkeit. Er legt das gemeinsame Programm fest, leitet dessen Durchführung, überwacht die Arbeiten, beschließt über den Aufbau und die Zusammensetzung der Forschungsgruppen und hat Entscheidungsbefugnis über Einzelausgaben ab 300 TDM. Ihm gehörten 1976 an:

seitens der Kommission:

Professor Dr. Donato Palumbo (Vorsitz)

und seitens des Instituts:

Professor Dr. Ewald Fünfer,
Dr. Gerhart von Gierke,
Dr. Ernst-Joachim Meusel,
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter,
Professor Dr. Rudolf Wienecke.

8. Der aus gewählten Vertretern der wissenschaftlichen Mitarbeiter bestehende **Wissenschaftlerrat** berät die Wissenschaftliche Leitung in allen Angelegenheiten ihres Entscheidungsbereiches, insbesondere in Fragen des wissenschaftlichen Programms, bei Struktur- und Personalfragen. Seit der Neuwahl im März 1976 gehören ihm an:

Dr. Wolfgang Engelhardt (Vorsitzender),
Dr. Walter Poschenrieder (stellvertretender Vorsitzender),

Dr. Klaus Büchl,
Dr. Ricardo Croci,
Dr. Peter Merkel,
Max Münich,
Dr. Heinz Ringler,
Jürgen Schneider,
Dr. Reinhard Volk,
Dr. Heinrich Weichselgartner.

9. Dem **Betriebsrat** des Instituts gehörten im Berichtsjahre an:

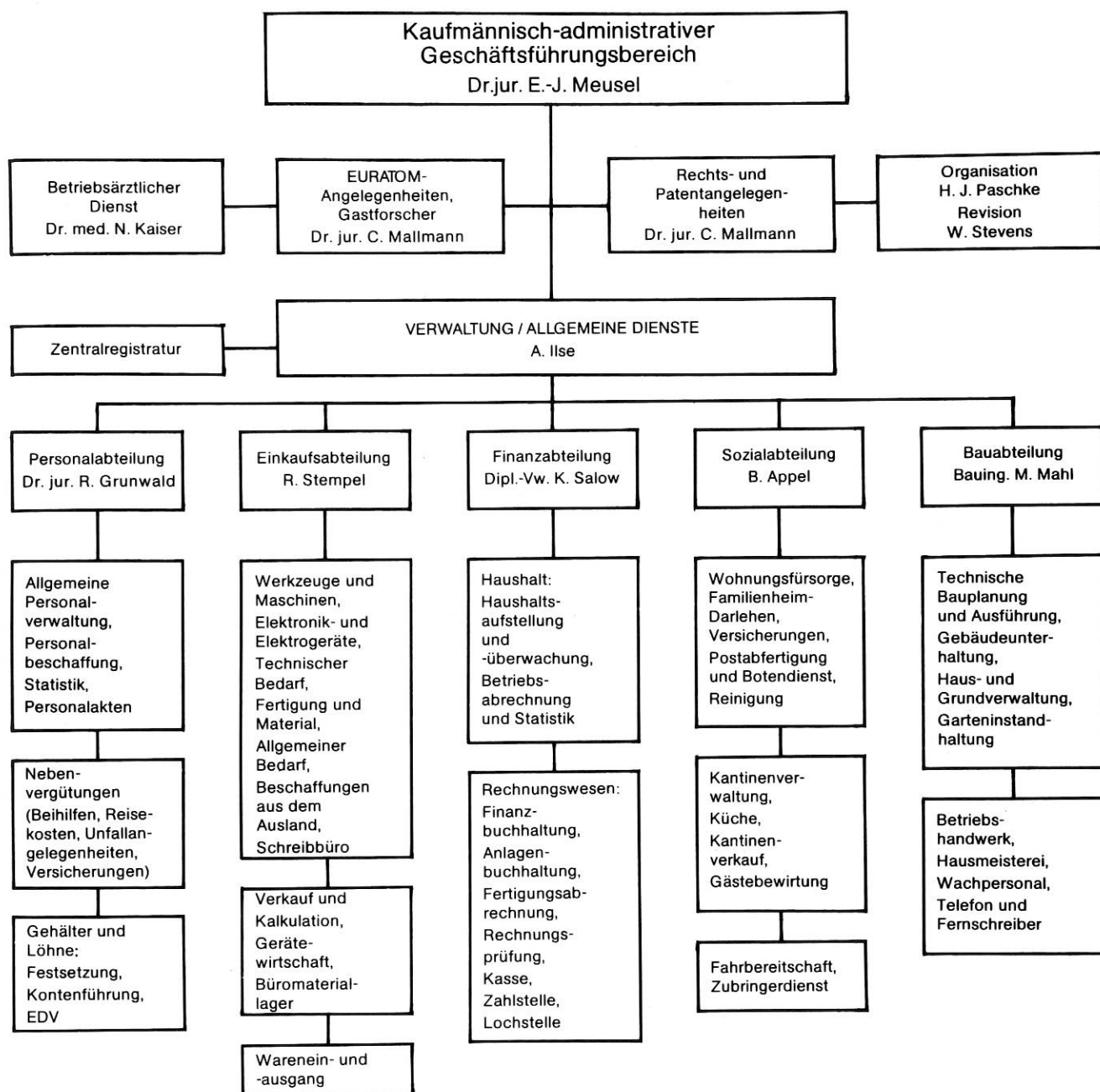
Heinz Fendl (hauptamtlich als Vorsitzender),

Fritz Lehnert (hauptamtlich als stellvertretender Vorsitzender),

Dr. Heinrich Wulff (hauptamtlich),

Anton Albrecht,
Adolf Felsner,
Heinz Flohr,
Manfred Hunger,
Dr. Rita Meyer-Spasche,
Ute Paschold,
Dr. Walter Poschenrieder,
Ursula Rang,
Rudolf Röber,
Georg Steidle,
Gerhard Wulff,
Irene Zellner.

Kaufmännische
Geschäftsführung,
Verwaltung,
Allgemeine Dienste



Rechts- und Vertragsangelegenheiten

(Dr. jur. Christoph Mallmann)

Die Schwerpunkte der Arbeit lagen in der Betreuung der Organe, in der Klärung von Rechtsfragen institutsrechtlicher und allgemeiner Art sowie in der Mitwirkung an nicht formularmäßig abgeschlossenen Verträgen.

Patentangelegenheiten

(Dr. jur. Christoph Mallmann, Dr.-Ing. Manfred Hüls)

Die Patentstelle verwaltet die gewerblichen Schutzrechte des IPP und sorgt für ihre Verwertung.

Am Jahresende 1976 wurden insgesamt 115 Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen betreut, die sich wie folgt aufgliedern:

erteilte deutsche Patente	8
erteilte ausländische Patente	46
eingetragene Gebrauchs- und Geschmacksmuster (Deutschland: 3, Ausland: 3, international: 1)	7
laufende deutsche Anmeldungen	23
laufende ausländische Anmeldungen	31

Die Verwertung der Schutzrechte erfolgt in Zusammenarbeit mit der Firma „Garching Instrumente, Gesellschaft zur industriellen Nutzung von Forschungsergebnissen m. b. H.“.

Organisation und Revision

(Hans-Joachim Paschke, Werner Stevens)

Die Organisation übt eine informierende und beratende Tätigkeit auf den Gebieten der EDV- und Allgemeinen Organisation aus. In diesem Rahmen wurden Organisationsanweisungen und Berichte für das Haushalts- und Rechnungswesen, das Bestellwesen und das Personalwesen vorgelegt. Die Arbeiten zur Erweiterung des Abrechnungssystems auf mehrere Buchhaltungen wurden fortgesetzt.

Die Revision führte im Rahmen des Prüfungsplanes Ordnungsmäßigkeitsprüfungen durch; sie war beratend tätig und begleitete die Tätigkeit externer Prüfer.

Betriebsärztlicher Dienst

(Dr. med. Nils Kaiser)

Im Betriebsärztlichen Dienst wurde im Jahre 1976 in 7464 Fällen ärztliche Hilfe geleistet; darin sind 41 Einstellungsuntersuchungen, 1079 Behandlungen, 148 Sonderuntersuchungen, 958 Vorsorgemaßnahmen und 148 arbeitsschutzrechtlich vorgeschriebene Untersuchungen enthalten. Weiter wurden 3589 Laborleistungen erbracht sowie Erste-Hilfe-Leistungen bei Unfällen und akuten Erkrankungen.

Verwaltung / 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.

Nach dem Vertrag zur Gründung der Projektgruppe für Laserforschung der Max-Planck-Gesellschaft e.V. wurden die Verwaltungsgeschäfte der Projektgruppe seit Jahresbeginn 1976 von der Verwaltung des IPP zusätzlich wahrgenommen. Dies brachte in allen Abteilungen einen spürbaren Arbeitsmehraufwand mit sich.

Personalabteilung

(Dr. jur. Reinhard Grunwald)

Vom 1. 1. 1976 bis 31. 12. 1976 ist die Anzahl der Beschäftigten im IPP von 1068 um 16 auf 1052 zurückgegangen. Dieser Rückgang ist hauptsächlich durch die Entsendung von 46 Bediensteten zur Projektgruppe für Laserforschung entstanden. Die Zahl der außerhalb des Stellenplans Beschäftigten hat sich gegenüber 1975 um 11, die Zahl der Mitarbeiter auf Planstellen um 5 Personen verringert.

Jahr	Planstellen-Ist	außerhalb des Stellenplans	Gesamt
1975	913	155	1068
1976	908	144	1052
	% 5	% 11	% 16

Die Löhne und Gehälter wurden tariflich mit Wirkung vom 1. 2. 1976 um 5% oder mindestens DM 85,- monat-

lich erhöht. Im Zuge der von den Zuwendungsgebern veranlaßten Sparmaßnahmen mußten Zulagen, die entsprechend der Sonderregelung 2/o zum BAT gewährt waren, in erheblichem Umfang zum 1. Juni 1976 widerrufen werden. Durch entsprechend angewandte Tarifverträge vom 2. 7. und 24. 6. 1975 wurden die Möglichkeiten des Bewährungsaufstieges für Lohnempfänger, wissenschaftliche Mitarbeiter sowie für Mitarbeiter des Innendienstes verbessert.

Die Austrittsfluktuation der Mitarbeiter auf Planstellen in der Zeit vom 1. 1. 1976 bis 31. 12. 1976 stellt sich wie folgt dar:

Gruppe 1 = wiss. Angestellte	AH4 - BAT Ia	3,9%
Gruppe 2 = wiss. Angestellte	BAT Ib - BAT IIa	1,7%
Gruppe 3 = techn. Angestellte	BAT IIaT - BAT Va	1,6%
Gruppe 4 = techn. Angestellte	BAT Vb - BAT VIb	2,1%
Gruppe 5 = techn. Angestellte	BAT VII - BAT X	0,0%
Gruppe 6 = Verw. Angestellte	S - BAT Vb	4,8%
Gruppe 7 = Verw. Angestellte	BAT Vc - BAT X	7,7%
Gruppe 8 = Facharbeiter	MTBI - MTB IV	2,1%
Gruppe 9 = ungel. Arbeiter	MTBV - MTB VIII	2,7%
Gesamtfluktuation		2,8%

Finanzabteilung

(Dipl.-Volkswirt Karl Salow)

Das Haushaltsvolumen des Instituts für das Jahr 1976 wurde vom Kuratorium auf **MDM 86,2** festgestellt.

Für tarifliche Steigerungen wurden Personalmehrmittel erforderlich von **4,4**

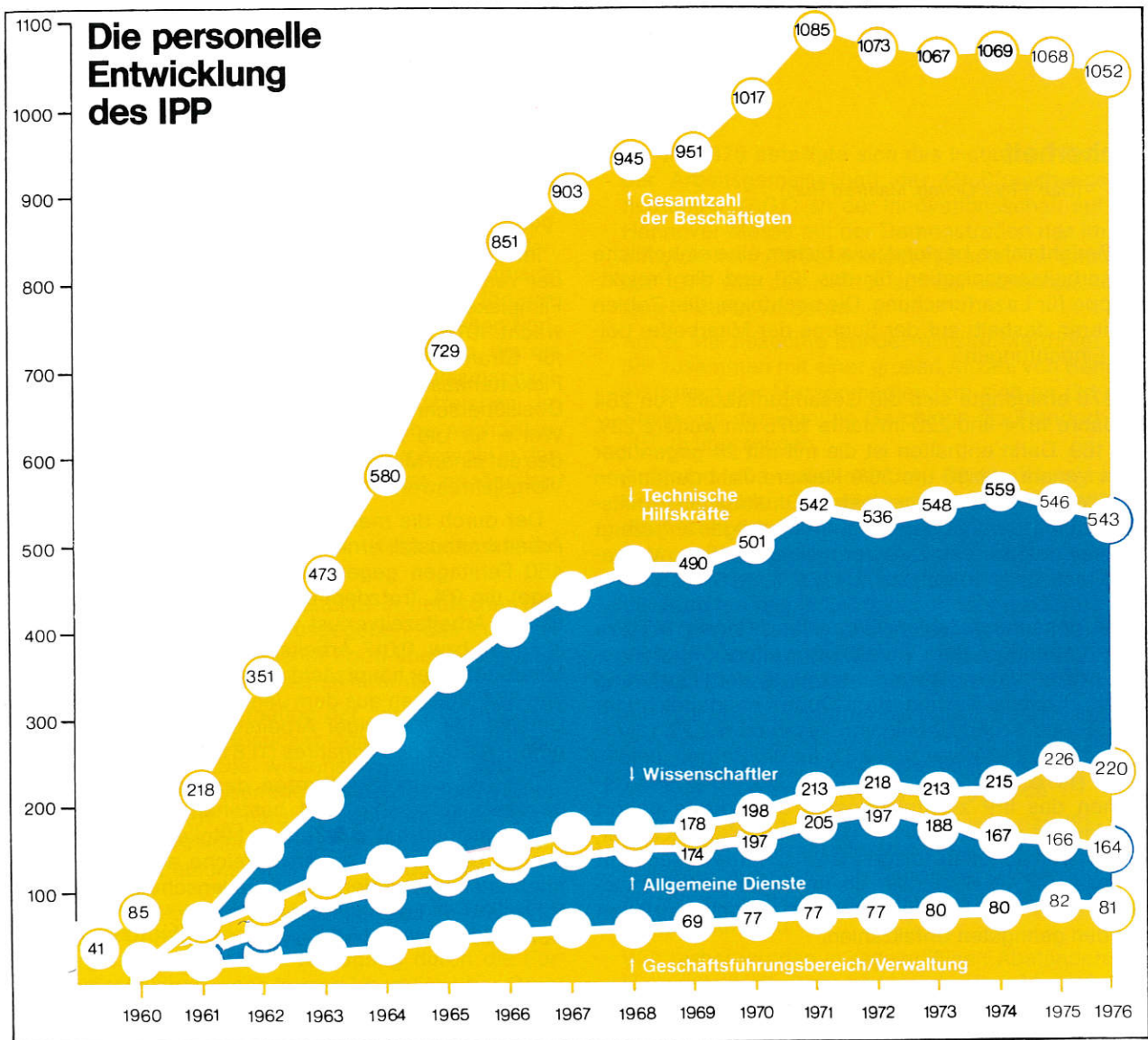
Das endgültige Haushaltsvolumen für 1976 belief sich auf **90,6**

Die Ausgaben im Berichtsjahre setzen sich, verglichen mit den Vorjahren, wie folgt zusammen:

Bezeichnung	1974 MDM	1975 MDM	1976 MDM
Personalausgaben	37,8	40,7	41,9
Sachausgaben	15,1	16,0	18,3
Betriebsausgaben	52,9	56,7	60,2
Lfd. Investitionen	10,2	12,1	8,6
Investitionen nach Plan	17,0	16,9	21,8
Summe Investitionen	27,2	29,0	30,4
Gesamtausgaben	80,1	85,7	90,6

Die Finanzierung wurde wie folgt vorgenommen:

	1974 MDM	1975 MDM	1976 MDM
Eigene Erträge	11,8	12,2	14,6
EURATOM-Zuschüsse	16,3	20,6	20,1
Zuschuß des Bundes	46,8	47,6	50,3
Zuschuß des Freistaates Bayern	5,2	5,3	5,6
Finanzierung insgesamt	80,1	85,7	90,6



Einkaufsabteilung

(Richard Stempel)

Das von der Einkaufsabteilung im Berichtsjahre zu bearbeitende Auftragsvolumen lag bei annähernd 30 MDM; die Anzahl der erteilten Aufträge betrug rund 10.500.

Besondere Schwerpunkte der Einkaufstätigkeit bildeten die Experimente ASDEX und „Neutralteilchen-Injektion“. Hierfür waren umfangreiche Ausschreibungen innerhalb des gesamten EG-Bereichs erforderlich.

Für das Experiment ASDEX wurden im Jahre 1976 die folgenden größeren Aufträge im Wege der Ausschreibung vergeben:

- Fertigung von 24 Magnetfeldspulen für den OH-Trafo an die Firma BBC (0,9 MDM).
- Lieferung und Montage eines Heiz- und Kühlsystems für Magnetfeldspulen und Vakuumgefäß an die Firma Mannesmann-Rohrbau AG (2,7 MDM).

– Entwicklung, Konstruktion, Lieferung und Montage des Divertor-Kühl- und Heizsystems an die Firma Linde AG (0,9 MDM).

– Fertigung der 6 Multipolspulen an die Firma BBC (1,3 MDM).

Für das Experiment „Neutralteilchen-Injektion“ und für die Stromversorgung dieses Experiments wurden vergeben:

- Lieferung und Montage einer Hochspannungsanlage mit einer Nennleistung von 8 x 1400 kW an die Firma Siemens (2,5 MDM).
- Fertigung von 4 Ionenquellen im Wert von rund 1,3 MDM bei den Culham Laboratories. Dieser Auftrag konnte im Rahmen der europäischen Zusammenarbeit auf Selbstkostenbasis und ohne Gewinnaufschläge abgeschlossen werden.

Für das Experiment WENDELSTEIN VII wurde eine Hochstrom-Anlage 6 kV, 40 kA an die Firma BBC vergeben (1,6 MDM).

Sicherheit

(Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Manfred Hüls)

Im Berichtsjahre bestand, wie bisher, eine einheitliche Sicherheitsorganisation für das IPP und die Projektgruppe für Laserforschung. Die nachfolgenden Zahlen basieren deshalb auf der Summe der Mitarbeiter beider Einrichtungen:

1976 erniedrigte sich die Gesamtunfallzahl von 264 im Jahre 1974 und 220 im Jahre 1975 um weitere 23% auf 169. Darin enthalten ist die mit 24 gegenüber dem Vorjahr mit 36 um 33% kleinere Zahl derjenigen Unfälle, die aufgrund einer mehr als dreitägigen Arbeitsunfähigkeit dem Sozialversicherungsträger angezeigt werden mußten. Die Zahl der meldepflichtigen Wegeunfälle verringerte sich auf 4 (1974: 5, 1975: 8).

Die genannten Zahlen führen für das Jahr 1976 zu einer gegenüber dem Vorjahr um weitere 5% geringeren prozentualen Gesamtunfallquote von 15,4% und einer ebenfalls verringerten Quote meldepflichtiger Wege- und Arbeitsunfälle von zusammen 2,2% (1974: 3,1%, 1975: 3,4%) bzw. von 1,8% für die Betriebsunfälle allein (1974: 2,7% und 1975: 2,6%). Mit dieser seit Bestehen des IPP zweitniedrigsten Unfallquote gehört das Institut im Vergleich zu der Zahl meldepflichtiger, den gewerblichen Berufsgenossenschaften insgesamt angezeigter Arbeitsunfälle, die im Vorjahr 77/1000 Versicherter = 7,7% betrug, auch 1976 zu den Betrieben mit den geringsten Unfallzahlen.

Im Berichtszeitraum wurden wiederum Mitarbeiter der verschiedenen Bereiche mit Stabdosimetern und Filmplaketten auf die erhaltene Strahlendosis überwacht. 1976 ergaben sich bei 1442 in der Gesellschaft für Strahlenforschung, Neuherberg, durchgeführten Plakettenauswertungen keine personenschädigenden Dosisüberschreitungen. Die höchsten ermittelten Werte für die Personen-Monatsdosis lagen bei 13% des auf einen Monat umgerechneten höchstzulässigen Vierteljahreswertes.

Der durch die meldepflichtigen Unfälle verursachte Arbeitszeitausfall erniedrigte sich 1976 mit insgesamt 450 Fehltagen gegenüber 1975 (496 Arbeitsausfalltage) um 9%. Trotzdem ergibt sich ein mittlerer spezifischer Arbeitszeitverlust von 18,8 Arbeitsausfalltagen je Unfall bzw. 0,017 Arbeitsausfalltagen je Unfall und Mitarbeiter, der hauptsächlich wegen eines Übertrages von 35 Fehltagen aus dem Jahr 1975 und infolge eines Unfalles mit 109tägiger Arbeitsunfähigkeit wesentlich größer als der des Vorjahres (11,8 bzw. 0,011) ist.

Der seit dem Inkrafttreten des Arbeitssicherheitsgesetzes vom 1. 12. 1974 bestehende Arbeitssicherheitsausschuß hat zur Zeit 45 Mitglieder, darunter 21 der für die verschiedenen Bereiche eingesetzten Sicherheitsbeauftragten, 10 Strahlenschutzverantwortliche und 9 Laserschutzbeauftragte. Die Freiwillige Betriebsfeuerwehr hatte am 31. 12. 1976 19 Mitglieder.

Sozialabteilung

(Berthold Appel)

Wohnungsfürsorge

Am Ende des Berichtsjahres verfügte das Institut über den folgenden Wohnungsbestand:

50 institutseigene Wohnungen

260 Wohnungen, bei denen das Institut ein Wohnungsbelegungsrecht hat

310 insgesamt, die sich nach Lage und Größe folgendermaßen aufgliedern:

	1-Zi.	2-Zi.	3-Zi.	4-Zi.	5-Zi.	Add.	in %
München	11	7	15	8	1	42	14
Garching	31	40	109	64	24	268	86
	42	47	124	72	25	310	100

Im Berichtsjahre wurden 17 Eigenheime mit Familien-darlehen gefördert.

Kantine

Das Institut hat auch 1976 die Beschäftigten der Nachbarinstitute in der Kantine beköstigt. Außerdem wurde das Gymnasium in Garching mit warmen Mittagmahlzeiten versorgt.

Fahrbereitschaft

Wegen der abgelegenen Lage und ohne die Anbindung an ein öffentliches Verkehrsnetz ist das Institut gezwungen, einen Zubringerdienst zu unterhalten.

Für die Beförderung bei Dienstbeginn und Diensthende sind 16 angemietete und zwei institutseigene Busse eingesetzt, die die Beschäftigten aus dem Raum München und den Nachbarlandkreisen Erding, Freising und Dachau aufnehmen. Darüber hinaus fahren die zwei institutseigenen Busse tagsüber in einem 30- bis 40minütigen Pendeldienst zwischen der U-Bahnstation „Studentenstadt“ München und dem Forschungsgelände.

Öffentlichkeitsarbeit

(Dipl.-Phys. Brigitte Röthlein)

Wie auch in den vergangenen Jahren war die Öffentlichkeitsarbeit des IPP auf mehrere Ziele konzentriert:

Die Forschungsarbeiten sollen einmal einer möglichst breiten Öffentlichkeit bekanntgemacht werden, um das Verständnis für die Bedeutung der Kernfusion als möglicher zukünftiger Energiequelle zu fördern; zum anderen ist es von Wichtigkeit, die erzielten Fortschritte in der Fusionsforschung aufzuzeigen, um die Stellung des IPP als eines der größten plasmaphysikalischen Forschungszentren zu unterstreichen. Im Berichtsjahre kam dazu noch die Aufgabe, nachdrücklich Garching's Eignung als JET-Standort sowohl in den Massenmedien als auch gegenüber den zuständigen Institutionen herauszustellen.

Im Rahmen dieser Ziele erscheint folgendes bemerkenswert:

- Im Juli 1976 wurde ein Faltblatt in deutscher und englischer Sprache herausgegeben, das in kurzer und allgemeinverständlicher Form über das Institut und seine Forschungsarbeiten informiert.
- Zur genaueren Information der naturwissenschaftlich vorgebildeten Besucher wurde eine Neuauflage der Broschüre „Die wissenschaftlichen Arbeiten des IPP“ erstellt. Zusammen mit dem populärwissenschaftlichen Heft „Energie durch Kernfusion“ steht nun für jede Art der Vorbildung der Besucher adäquates Informationsmaterial zur Verfügung.
- Zusätzlich wurde eine 20minütige Tonbildschau über das Institut erstellt, die es ermöglicht, Besuchergruppen vor einem Rundgang durch die Forschungsanlagen einen kurzen Überblick über Organisation, Aufgaben und Ziele des IPP zu geben.
- Im Mai 1976 beteiligte sich das Institut im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF) an der Innovationsschau auf der Hannover-Messe mit der Demonstration des im IPP entwickelten AMOS-Betriebssystems. Im September 1976 war das Institut auf der Industrieausstellung in Berlin vertreten.
- Am 5. Mai besuchte Bundesminister Matthöfer das IPP zusammen mit einer großen Anzahl von Berichtserstattem der Massenmedien, um sich an Ort und Stelle von der Eignung Garching's als Standort des JET zu überzeugen.
- Aufgrund des zunehmenden Bekanntheitsgrades des IPP in der Öffentlichkeit (im Berichtsjahr war die Anzahl der Zeitungsmeldungen über fünfmal so hoch wie im Vorjahr) war das Interesse von Journalisten an Berichten, Reportagen und Filmen über die Arbeiten des Instituts besonders groß. Aus diesem Grund wurden die Massenmedien mit einer Vielzahl von Informationen versorgt; Filmteams mußten beraten und betreut werden.
- Auf das gestiegene Interesse der Öffentlichkeit an den Forschungsarbeiten des IPP ist es auch zurückzuführen, daß der diesjährige Tag der offenen Tür mit über 6000 Besuchern ein Erfolg wurde.
- Auch außerhalb dieses Tages wurde das IPP von vielen Interessierten wie Schülern, Studenten, Fachkollegen, Vertretern von Behörden, Ministerien und Forschungseinrichtungen besichtigt. Die Besucherzahl lag bei 1300.
- Wie bisher wurden in regelmäßigen Abständen die Hauszeitschrift „Impulse“ sowie die „Monatlichen Mitteilungen“ herausgegeben.

Bauabteilung

(Bauingenieur Martin Mahl)

Neubauten

Die Bauarbeiten für das Pumpenhaus des Experiments ASDEX wurden im Mai 1976 beendet. Anschließend wurde mit dem Einbau des Heiz- und Kühlsystems begonnen.

Im September 1976 wurden die Bauarbeiten am Maschinenhaus EZ 3 aufgenommen; der Rohbau konnte zum Jahresende fertiggestellt werden.

Im Mai 1976 begannen die Arbeiten für den Anbau der Halle L 6; im Oktober war der Rohbau abgeschlossen. Da die Ausbauarbeiten zügig vorangehen, kann bereits im Mai 1977 mit dem Einzug in den Neubau gerechnet werden.

Im Zuge der Erweiterung der Energieversorgung wurde der Bau eines Fundamentes für 5 Transforma-

toren mit Schaltheis und eines Kabelkanals von 200 m Länge abgeschlossen.

Gebäude in Planung

Im Jahre 1977 wird eine neue Zufahrtsstraße von der Bundesstraße 11 und der Bundesautobahn München-Nürnberg zum Forschungsgelände gebaut. Dafür muß eine neue Institutseinfahrt mit einer Hauptpforte geschaffen werden; die Planung dazu ist im Gange.

Veröffentlichungen und Konferenzberichte

Veröffentlichungen und Konferenzberichte

Veröffentlichungen und Konferenzberichte

Veröffentlichungen und Konferenzberichte

Veröffentlichungen und Konferenzberichte

Veröffentlichungen und Konferenzberichte

Veröffentlichungen und Konferenzberichte

Veröffentlichungen und Konferenzberichte

Veröffentlichungen,
Konferenzberichte,
Autorenverzeichnis

Veröffentlichungen und Konferenzberichte

Bereich Hoch-Beta-Plasmen

- 1 *Becker, G.
Düchs, D. F.* Plasma Transport Computations for High-Beta Plasmas with Impurities and Neutrals
Nuclear Fusion **16**, 763 (1976)
- 2 *Becker, G.
Lackner, K.* Axisymmetric Instabilities of Non-Circular Plasma Cross-Sections and Computation of Highly Elongated Tokamak Equilibria
Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA – CN – 35/B 11-3 (1976)
- 3 *Becker, G.
Gruber, O.
Krause, H.
Lackner, K.
Mast, F.
Wilhelm, R.* Structure of Flux Surfaces in the Highly Elongated Belt Pinch Equilibria
Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, **21**, 1092 (1976)
- 4 *Breit, E.
Gruber, J. E.
Münich, M.
Schramm, G.
Seidel, U.
Süß, R.* A Modular Power-Crowbar Bank for the Generation of a 50 MA, 50 μ sec Current Pulse for the Toroidal Plasma Experiment HBS II at Garching
Proc. IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Vortrag III E (1976)
- 5 *Chodura, R.
Schlüter, A.* In Search of Stable 3 D MHD-Equilibria
Proc. 2nd Europ. Conf. on Computational Physics, Garching, P. C2 (1976)
- 6 *Düchs, D. F.
Schneider, W.* DEQTRAN – a Program Generator for the Solution of 1 D Systems of Partial Differential Equations
Proc. Second Europ. Conf. on Computational Physics, Garching, P. E 5 (1976)
- 7 *Gruber, J. E.* Ein Beitrag zum elektrischen Gleitüberschlag von Isolierfolien in Kollektoranordnungen
DFG Koll. „Physik der elektr. Entladungen in der Hochspannungstechnik“, Vortrag 13 (1976)
- 8 *Gruber, O.
Krause, H.
Mast, F.
Wilhelm, R.* Der Belt Pinch II mit verstärkter Stoßwellenheizung
Verhandl. DPG (VI), **11**, ; 204 (1976)
- 9 *Gruber, O.
Krause, H.
Mast, F.
Wilhelm, R.* Energy Confinement and MHD Stability in Belt-Pinch IIa
Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA – CN 35/A 10–2 (1976)
- 10 *Gruber, O.
Wilhelm, R.* The Belt-Pinch, a High- β -Tokamak with Non-Circular Cross-Section
Nuclear Fusion **16**, 243 (1976)
- 11 *Hermegger, F.
Kaufmann, M.
Lortz, D.
Neuhauser, J.
Nührenberg, J.
Schneider, W.
Schramm, G.* Experimental and Theoretical Study of the FLR Stabilization in the High-Beta-Stellarator Equilibrium and Stability of MHD Configurations with Zero Rotational Transform
Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA – CN – 35/E9 (1976)

- 12 Herrnegger, F.
Schneider, W. Ideal MHD Stability of $m \geq 2$ Modes in Diffuse High- β , $\ell = 1$ Equilibria
- 13 Herrnegger, F.
Schneider, W. MHD Instabilities of 2 D Diffuse High-Beta Equilibria as an Initial-Boundary-Value Problem Proc. Second Europ. Conf. on Computational Physics, Garching, P. C 5 (1976)
- 14 Kaufmann, M.
Neuhauser, J.
Röhr, H. Experimental Test of Finite Larmor Radius Stabilization in Toroidal Theta-Pinches and Extrapolation to Reactor Parameters Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, 21, 1093 (1976)
- 15 Köppendörfer, W.
Münich, M.
Sommer, J. The Limits in the Production of a Low Compressed High-Beta Plasma in the Linear Theta Pinch ISAR II Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA - CN - 35/E13-1 (1976)
- 16 Krause, H. Equilibrium and Stability Investigations in the Belt-Pinch Nuclear Fusion 15, 855 (1975)
- 17 Langer, H.
Röhr, H.
Steuer, K.-H.
Wrobel, W.-G. Resonance and Rayleigh Scattering from the Neutral Gas Background of Plasmas Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, 21, 1061 (1976)
- 18 Söldner, F.
Steuer, K.-H. Erzeugung schwach komprimierter Plasmen hoher Temperatur im Hochspannungs-Belt-Pinch Verhandl. DPG (VI), 11, 205 (1976)
- 19 Söldner, F.
Steuer, K.-H. Production of Shock Heated Weakly Compressed High Temperature Plasmas in the High Voltage Belt-Pinch Pulsed High Beta Plasmas edited by D.E. Evans, Pergamon Press, 527 (1976)
- 20 Söldner, F.
Steuer, K.-H. Shock Heating of Collisionless Plasmas in Toroidal Geometry Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA - CN - 35 / E 13-2 (1976)
- 21 Söldner, F.
Steuer, K.-H.
Müller, G. *)
Thumm, M. *)
Warich, L. *)
Zwicker, H. *) Fast Shock Heating and Plasma Confinement in the High Voltage Belt-Pinch Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, 21, 1093 (1976)
- 22 Steuer, K.-H. Neuere Entwicklungen bei der Laserlichtstreuung an Hochtemperaturplasmen Verhandl. DPG (VI), 11, 206 (1976)
- 23 Wrobel, W.-G.
Steuer, K.-H. Rayleighstreuung am Neutralgasuntergrund eines Plasmas in der Nähe von Emissionslinien Verhandl. DPG (VI), 11, 208 (1976)
- 24 Wrobel, W.-G.
Steuer, K.-H.
Röhr, H. Rayleigh Scattering from Excited Atoms in Plasmas Physical Review Letters 37, 1218 (1976)
- 25 Wrobel, W.-G.
Steuer, K.-H.
Röhr, H. Rayleigh and Resonance Scattering in a Z-Pinch Using a Dye Laser APS Conf. on Diagnostics of High Temperature Plasmas, Oakridge, Report B - 6 (1976)
- 26 Wilhelm, R. Fast Rising Magnetic Field with Long Pulse Duration - A New Technical Concept for Large Plasma Experiments Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 10, 4430 (1976)

Bereich Niedrig-Beta-Stellaratoren

- 27 Bäumler, J.
Junker, J.
Melkus, W.
Ott, W.
Probst, F.
Speth, E. The Wendelstein VII A Injection System. Proc. 9th Symp. on Fusion Techn., Garmisch-Partenkirchen, K 1 - 2 (1976)

*) Kein Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, Garching.

- 28 *Bescher, G.* Systeme de contrôle du Stellarator WEGA par le microordinateur MICRAL-G, Rapport EUR-CEA-FC-818, April (1976)
- 29 *Blanc, P.*
Hess, W.
Ichtchenko, G.
Javel, P.
Lallia, P.
Mahn, C.
Nguyen, T.K.
Ohlendorf, W.
Pacher, G.W.
Pacher, H.D.
Takamura, S.
Tonon, G.
Wegrowe, J.-G. Lower Hybrid Experiments in the WEGA Tokamak.

Proc. 3rd Intern. Meeting on Theoretical and Exp. Aspects of Heating of Toroidal Plasmas, Grenoble, 2, 251 (1976)
- 30 *Blanc, P.*
Hess, W.
Ichtchenko, G.
Javel, P.
Lallia, P.
Mahn, C.
Nguyen, T.K.
Ohlendorf, W.
Pacher, G.W.
Pacher, H.D.
Takamura, S.
Tonon, G.
Wegrowe, J.-G. Experiments at the Lower Hybrid Frequency in the WEGA Tokamak.

Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA – CN-35/G9 (1976)
- 31 *Blanc, P.*
Hess, W.
Ichtchenko, G.
Javel, P.
Lallia, P.
Mahn, C.
Nguyen, T.K.
Ohlendorf, W.
Pacher, G.W.
Pacher, H.D.
Takamura, S.
Tonon, G.
Wegrowe, J.-G. Experiments in the WEGA Tokamak at the Lower Hybrid Frequency.

Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 9, 5D3 (1976)
- 32 *Blanc, P.*
Mahn, C.
Tonon, G.
Wegrowe, J.-G. Electron Energy Distribution Measurements under Application of HF Power in WEGA.

Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 9, 5D2 (1976)
- 33 *Blanc, P.*
Hess, W.
Ichtchenko, G.
Lallia, P.
Mahn, C.
Nguyen, T.K.
Ohlendorf, W.
Pacher, G.W.
Pacher, H.D.
Tonon, G.
Wegrowe, J.-G. RF Heating Experiments in the WEGA Tokamak.

Congrès National de Physique des Plasmas, Paris (1976)
Proc. to be published in Journal de Physique.
- 34 *Braunsberger, U.**
van Mark, E.
Müller, G.A. A Circuit Breaker Fuse System For the Wendelstein Ohmic Heating Circuit.

Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, (1976)
- 35 *Cattanei, G.*
Croci, R. Theory of Ion Cyclotron Resonance Heating.

Proc. 3rd Intern. Meeting on Theoretical and Exp. Aspects of Heating of Toroidal Plasmas, Grenoble (1976)

36. Derfler, H.
Gehre, O.
Leuterer, F.
Mayer, H.M.
Tutter, M.
Lower Hybrid Heating in a Mirror Machine.
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1107, 5D7 (1976)
37. Derfler, H.
Leuterer, F.
Power Flow in RF Plasma Heating at $\omega > \omega_{LH}$.
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1145, 7F8 (1976)
38. Feist, J. H.
Junker, J.
Ott, W.
Speth, E.
Wobig, H.
Neutral Injection of Wendelstein VII A Stellarator.
Proc. 3rd Intern. Meeting on Theoretical and Exp. Aspects of Heating of Toroidal Plasmas, Grenoble, I, 17 (1976)
39. Fritsch, R.
Lipa, M.
Ohlendorf, W.
Pacher, G.W.
Pacher, H.D.
Wegrowe, J.-G.
Technological Aspects of the WEGA Stellarator.
Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, C 2-4, p. 40 (1976)
40. Lallia, P.
Pacher, G.W.
Pacher, H.D.
Ion Measurements During Lower Hybrid Experiments in WEGA.
Proc. 3rd Intern. Symp. on Plasma Heating in Toroidal Devices, Varenna (1976)
41. Leuterer, F.
Puri, S.
Tutter, M.
Asymptotic waves in a Vlasov plasma.
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1074, 3F1 (1976)
42. Leuterer, F.
Puri, S.
Tutter, M.
Structure of $k \perp B$ Modes in a Vlasov plasma.
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1169, 8H10 (1976)
43. Leuterer, F.
Derfler, H.
On the Mutual Interaction of R.F. Coupling Gaps.
Proc. 3rd Intern. Meeting on Theoretical and Exp. Aspects of Heating of Toroidal Plasmas, Grenoble, p. 115 (1976)
44. Pacher, G.W.
Pacher, H.D.
Radial Position Control of the WEGA Plasma by Feedback.
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 9, 5D1 (1976)
45. Streibl, B.
Toroidal Arrangement of Modular Cylindrical Multipole Magnets for Producing an External Rotational Transform.
Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen (1976)
46. Takamura, S.
Nguyen, T.-K.
Coupling and Matching of antennas for Lower Hybrid Wave Heating.
Proc. 3rd Intern. Meeting on Theoretical and Experimental Aspects of Heating of Toroidal Plasmas, Grenoble, 1, 123 (1976)
47. Takamura, S.
Javel, P.
Observation of turbulent Spectra during the Lower Hybrid Heating in the WEGA Tokamak.
Rapport EUR-CEA-FC-863, November (1976)
48. W VII A-Team:
Blaumoser, M.
Cattanei, G.
Cavallo, A. *)
Dorst, D.
Elsner, A.
Hacker, H.
Jaeckel, H.
Jaenicke, R.
Junker, J.
Kick, M.
Kunze, R.-C.
Leuterer, F.
van Mark, E.
Marlier, S.
Müller, G.
van Oordt, A.
Rau, F.
Rehker, S.
Ohmic Heating in the W VII A Stellarator.

*) Gastforscher

- Renner, H.
 Ringler, H.
 Saffert, J.
 Sapper, J.
 Smeulders, P.
 Tutter, M.
 Weller, A.
 Wobig, H.
 Würsching, E.
 Zippe, M.
- Ohmic Heating in the W VII A Stellarator
- Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA – CN-35/D2 (1976)
- 49 W VII A-Team First Experiments with Ohmically Heated Plasmas in the Wendelstein VII A Stellarator. Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1124, 6C10 (1976)

Bereich Tokamak

PULSATOR und ASDEX

- 50 Becker, G.
 Lackner, K.
- Equilibrium Restriction for Elongated Tokamaks
 ibid, paper B11-3
- 51 Becker, G.
 Gruber, O.
 Krause, H.
 Lackner, K.
 Mast, F.
 Wilhelm, R.
- Structure of Flux Surfaces in the Highly Elongated Belt Pinch Equilibria
- Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, 21, 1092 (1976)
- 52 Broser, E. et al.
- Design and Manufacture of the ASDEX Toroidal Field Coils
 Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, 205 (1976)
- 53 Engelhardt, W.
 Cannici, B.
 Fußmann, G.
 Gernhardt, J.
 Glock, E.
 Karger, F.
 Klüber, O.
 Lisitano, G.
 Mayer, H.-M.
 McCormick, K.
 Meisel, D.
 Morandi, P.
 Sesnic, S.
 Wagner, F.
- Confinement and Stability of High Density Plasma in the Pulsator Tokamak
- Bull. Am. Phys. Soc., 21, 1050 (1976)
- 54 Engelhardt, W.
 Cannici, B.
 Fußmann, G.
 Gernhardt, J.
 Glock, E.
 Groening, D. E.
 Karger, F.
 Klüber, O.
 Lisitano, G.
 Mayer, H. M.
 Meisel, D.
 Morandi, P.
 Sesnic, S.
 Wagner, F.
 Zehrfeld, H. P.
- Ein neues Regime mit wesentlich verbesserten Plasmaeigenschaften im Tokamak
- Verhandl. DGPG (VI), 11, 201, P18 (1976)
- 55 Engelhardt, W.
- Das Verunreinigungsproblem in Fusionsplasmen
 DPG-Frühjahrstagung, Hannover 1976, H3
- 56 Green, B. J.
 Zehrfeld, H.-P.
- Local, Ideal and Resistive Stability in Tokamaks with Noncircular Cross Section
 Bull. Am. Phys. Soc., 21, 1033 (1976)

- 57 Green, B. J.
Jacquinot, J.
Lackner, K.
Gibson, A. The Scaling of Plasma Beta in a Tokamak

Nuclear Fusion 16, 521–524 (1976)
- 58 Haas, G.
Keilhacker, M.
Poschenrieder, W.
Wagner, F. Divertor Pumping System of ASDEX

Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, 73 (1976)
- 59 Haas, G.
Henkes, W.
Keilhacker, M.
Klingelhöfer, R.
Stäbler, A. Additional Heating and Refuelling for the ASDEX Divertor Tokamak

Proc. 6th Symp. on Plasma Heating in Toroidal Devices, Varenna (1976)
- 60 Haas, G.
Keilhacker, M. Control of Plasma Wall Interaction in the ASDEX Divertor Tokamak
Proc. of the Intern. Symp. on Plasma Wall Interaction, Jülich, F3 (1976)
- 61 Haas, G.
Keilhacker, M.
Poschenrieder, W.
Vernickel, H.
Wagner, F. Aspects of Plasma-Wall-Interaction in the Divertor Experiment

Proc. Intern. Conf. on Surface Effects in Contr. Fus. Devices, San Francisco
J. Nucl. Mat. 63, (1976)
- 62 Hartz, F. et al. Technical Concept for the Multipole Coils of ASDEX
Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, 197 (1976)
- 63 Karger, F.
Fußmann, G.
Lackner, K.
Cannici, B.
Engelhardt, W.
Gernhardt, J.
Glock, E.
Groening, D. E.
Klüber, O.
Lisitano, G.
Mayer, H.-M.
Meisel, D.
Morandi, P.
Sesnic, S.
Wagner, F.
Zehrfeld, H.-P. On the Origin of the Disruptive Instability in the Pulsator I Tokamak

Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden,
IAEA – A7 (1976)
- 64 Keilhacker, M. Magnetic Divertors
Proc. of Summer School on Tokamak Reactors for Breakeven, Erice (Italy), (1976)
und IPP-Report III/33
- 65 Keilhacker, M. Design and Manufacture of the Toroidal and Poloidal Field Coils for ASDEX
Proc. IAEA Second Large Tokamak Conference, Princeton (1976) – to be published
in Nuclear Fusion
- 66 Klüber, O. Investigation on the Disruptive Instability in Pulsator
Proc. 7th Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics II; Centre de
Recherches en Physique des Plasmas, Lausanne, 50 (1975)
- 67 Klüber, O.
Cannici, B.
Engelhardt, W.
Gernhardt, J.
Glock, E.
Karger, F.
Lisitano, G.
Mayer, H.-M.
Meisel, D.
Morandi, P.
Sesnic, S.
Wagner, F. High Density Operation in Pulsator

JET Workshop on High Density Tokamak Results and Implications for JET, JTN/B (76), 56,
p. 66, Culham (1976)

- 68 Klüber, O.
Karger, F.
Fußmann, G. Evolution of the Disruptive Instability in Pulsator
Bull. Am. Phys. Soc., 21, 1050 (1976)
- 69 Lackner, K. Axisymmetric Stability of Numerically Computed Tokamak Equilibria
Proc. 2nd European Conference on Computational Physics, Garching, C4 (1976)
- 70 Lackner, K. Computation of Ideal MHD Equilibria 2nd European Conference on Computational Physics,
Garching, Computer Physics Communication 12, 33-44 (1976)
- 71 Lackner, K. Influence of Current Distribution and Aspect Ratio on Axisymmetric Instabilities, *ibid*,
paper B11-3
- 72 Meisel, D.
Klüber, O.
Cannici, B.
Engelhardt, W.
Fußmann, G.
Gernhardt, J.
Glock, E.
Karger, F.
Lisitano, G.
Mayer, H.-M.
Morandi, P.
Sesnic, S.
Wagner, F. General Properties and Stability Behaviour of High Density Tokamak Plasmas in Pulsator I
6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden,
IAEA, A6 (1976)
- 73 Preis, H.
Wedler, H. The ASDEX Ohmic Heating Electrical System, Proc. 9th Symp. on Fusion Technology,
Garmisch-Partenkirchen, 753 (1976)
- 74 Rapp, H.
Gresser F. The Power Supply for the Poloidal Field Coils of ASDEX
Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, 691, (1976)
- 75 Rapp, H. Power Supply System for ASDEX
Proc. IAEA Second Large Tokamak Conference, Princeton (1976)
to be published in Nuclear Fusion
- 76 Schneider, F.
Gresser, F. Investigations on the Feedback System of ASDEX
Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, 783 (1976)
- 77 Sesnic, S. Internal Disruptions and Impurities at High Densities in Pulsator
JET Workshop on High Density Tokamak Results and Implications for JET, JTN/B (76) 56,
p. 56, Culham (1976)
- 78 Sesnic, S.
Cannici, B.
Engelhardt, W.
Fußmann, G.
Gernhardt, J.
Glock, E.
Karger, F.
Klüber, O.
Lisitano, G.
Mayer, H.-M.
McCormick, K.
Meisel, D.
Morandi, P.
Wagner, F. Review of the Work on Impurities and Plasma Wall Interaction in the Pulsator Tokamak
Intern. Symposium on Plasma Wall Interaction, Jülich (1976)
- 79 Sesnic, S. Evolution of High-Z Impurities at High Densities in Pulsator Tokamak
Bull. Am. Phys. Soc., 21, 1050 (1976)
- 80 Stäbler, A.
Haas, G.
Ott, W.
Speth, E. On the Refuelling of Large Divertor Experiments
Proc. 3rd Intern. Meeting on Theor. and Exp. Aspects of Heating of Toroidal Plasmas,
Grenoble, 1, 49 (1976)
- 81 Wagner, F.
Mayer, H.-M. Neutral Particle Emission of the Pulsator Plasma during High-Density Discharges
Intern. Symposium on Plasma Wall Interaction, Jülich (1976)

Wellen im Plasma

- 82 *Derfler, H.* Covariant Wave Dispersion Theory
Bulletin of the American Physical Soc. II, 21, 1107 (1976)
- 83 *Derfler, H.* Excitation of Plasma Waves by Gaps and Slow-Wave Structures
Proc. Symposium on Plasma Heating in Toroidal Devices, Varenna, Editrice Compositori, Bologna, 91-101
- 84 *Fried, B. D.*
Conte, S. D. The Plasma Dispersion Function
Academic Press, New York
- 85 *Leuterer, F.*
Tutter, M.
Puri, S. Structure of $k \perp B$ Modes in a Vlasov Plasma,
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1168 (1976)
- 86 *Leuterer, F.*
Derfler, H. On the Mutual Interaction of R.F.-Coupling Gaps
Proc. 3rd Intern. Meeting on Theor. and Exp. Aspects of Heating of Toroidal Plasmas, Grenoble, 1, 115-121 (1976)
- 87 *Leuterer, F.*
Derfler, H. Gap Excitation of Plasma Waves in a Bounded Inhomogeneous Plasma
Plasma Phys. 18, 453-469 (1976)
- 88 *Leuterer, F.*
Derfler, H. Power Flow in R.F. Plasma Heating at $\omega > \omega_{LH}$
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1145 (1976)
- 89 *Ono, M.*
(Princeton Univ.)
Chang, R. P. H.
(Bell Labs.)
Porkolab, M. Experimental Observation of Parametric Decay Instabilities in a Multispecies Plasma
Parametric Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1180 (1976)
- 90 *Ono, M.*
(Princeton Univ.)
Chang, R. P. H.
(Bell Labs.)
Porkolab, M. Parametric Excitation of Resonant and Nonresonant Ion Cyclotron Waves in a Multispecies Plasma
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1168 (1976)
- 91 *Porkolab, M.* Ion Damping Mechanism of Lower Hybrid Waves
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1168 (1976)
- 92 *Porkolab, M.* Parametric Instabilities in Lower Hybrid Heating of Tokamaks
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1107 (1976)
- 93 *Peratt, A. L.*
Watterson, R. L. Coherent Scattering of CO₂-Light from Ion-Acoustic Waves, I. Theory
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1032 (1976)
- 94 *Puri, S.*
Leuterer, F.
Tutter, M. Asymptotic Waves in a Vlasov Plasma
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1074 (1976)
- 95 *Sagdeev, R. Z.*
Galeev, A. A. Non-linear Plasma Theory W. A. Benjamin Inc. New York
- 96 *Tutter, M.*
Derfler, H.
Gehre, O.
Leuterer, F.
Mayer, H. M. Lower Hybrid Heating in a Mirror Machine
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1107 (1976)
- 97 *Watterson, R. L.*
Peratt, A. L. Coherent Scattering of CO₂-Light from Ion-Acoustic Waves, II. Experiment
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 1032 (1976)

JET

- 98 *Bombi, F.*
Ciscato, D.
Congiu, S.
Noll, P.
Zimmermann, D. A CAMAC based Control and Data Acquisition system for the JET Experiment.
ESONE Annual General Assembly, York, UK (1976)

- 99 *Bombi, F.*
Ciscato, D.
Congiu, S.
Noll, P.
Zimmermann, D. Control and Data Acquisition for the JET Experiment
Proc. 2nd Large Tokamak Conference, Princeton (1976)
- 100 *Eckhartt, D.* JET – ein europäisches Großprojekt zur Fusionsforschung.
Reaktortagung Düsseldorf 1976, ZAED, KFZ Karlsruhe, 861 (1976)
- 101 *Eckhartt, D.* Vacuum Vessel and Pumping System of the JET Experiment
Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, EUR 5602, Commission of the European Communities, Luxembourg (1976)
- 102 *Eckhartt, D.*
Bernardini, M.
Snykers, M. On the Choice of the First Wall Material for the JET Experiment
Intern. Symposium Plasma Wall Interaction, Jülich, F 1 (1976)
- 103 *Eckhartt, D.* Design and Manufacture of the JET Vacuum Vessel
Proc. 2nd Large Tokamaks Conference, Princeton (1976)
- 103a *Eckhartt, D.* Activation Calculation for the JET Assembly
Proc. 2nd Large Tokamaks Conference, Princeton (1976)
- 104 *Green, B. J.*
Rebut, P. H. The Effect of Impurity Radiation on Tokamak Equilibrium
Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA-CN-35/B6 (1976)
- 105 *Poehlchen, R.* The JET Toroidal Field Coils – Design State
Proc. 2nd Large Tokamaks Conference, Princeton (1976)
- 105a *Poehlchen, R.* The JET Toroidal Field Coils – Stress Analysis
Proc. 2nd Large Tokamaks Conference, Princeton (1976)
- 106 *Streibl, B.* Toroidal Arrangement of Modular Cylindrical Multipole Magnets for Producing an External Rotational Transform
Proc. 9th Symp. on Fusion Technology, EUR 5602, Commission of the European Communities, 217 (1976)
- 107 *Venus, G.*
Klipping, G.
Frank, R.
Forth, H. J.
Jensen, K. Boundary Conditions for Cryo-Pumping in Fusion Machines of the Type
Proc. 6th International Cryogenic Engineering Conference, Grenoble (4/1976)
- 108 *Venus, G.*
Frank, R.
Forth, H. J.
Lentges, G.
Jensen, K.
Klipping, G. Description of the Cryo-Pumps and Cryogenic Anillary Equipment as Proposed for JET
Proc. 6th International Cryogenic Engineering Conference, Grenoble, C 1 (1976)
- 109 *Venus, G.*
Clerc, H. Tritium Handling Scheme for the JET Experiment
Proc. 9th Symposium on Fusion Technology, EUR-5602, Commission of the European Communities, 359 (1976)
- 110 *Venus, G.* Vacuum Systems in JET
Proc. 2nd Large Tokamaks Conference, Princeton (1976)
Nov. 26 – Dec. 1, 1976

Bereich Theorie

- 111 *Becker, G.*
Düchs, D. Diffusion Processes in High- β Plasmas Including Neutral Gas and Impurity Effects
Pulsed High- β Plasmas, Pergamon Press, Oxford – New York, D 2.4 (1976)
- 112 *Becker, G.*
Düchs, D. Plasma Transport Computations for High- β Plasmas with Impurities and Neutrals
Nucl. Fusion 16, 763 (1976)
- 113 *Biskamp, D.*
Welter, H. Numerical Computation of Nonlinear Tearing Modes
Proc. 2nd European Conf. on Computational Physics, ed. by D. Biskamp, Garching, D 2 (1976)

- 114 *Biskamp, D.*
Welter, H. Numerical Studies of Resistive Instabilities
Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, B 2-2 (1976)
- 115 *Biskamp, D.* Editor, "Computing in Plasma Physics and Astrophysics"
Proc. 2nd European Conf. on Computational Physics, Garching, Computer Physics Communications, 12, No. 1 (1976)
- 116 *Chodura, R.*
Schlüter, A. In Search of Stable 3 D MHD-Equilibria
Proc. 2nd European Conf. on Computational Physics, Garching, C 2 (1976)
- 117 *Düchs, D.*
Schneider, W. DEQTRAN-A Programm Generator for the Solution of 1 D Systems of Partial Differential Equations
Proc. 2nd European Conf. on Computational Physics, Garching, E 5 (1976)
- 118 *Düchs, D.* Numerical Modelling of High Density Plasmas in Tokamaks with Pulsed Gas Influx
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, No. 9, p. 1125, paper 6D-10 (1976)
- 119 *Dum, C.T.* Selfconsistent Anomalous Electron Transport Equation for Ion Sound Turbulence
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, p. 1085 (1976)
- 120 *Finck v. Finckenstein,*
K. Graf
Düchs, D. Convergence of Difference Methods for Quasilinear Diffusion Problems in Cylindrical Symmetry
Methoden und Verfahren der mathem. Physik, Bd. 15, BI Wissenschaftsverlag, 75 (1976)
- 121 *Lortz, D.*
Nührenberg, J. Equilibrium and Stability of a Three-Dimensional Toroidal MHD Configuration Near its Magnetic Axis
Z. Naturforschung 31a, 1277 (1976)
- 122 *Lortz, D.*
Nührenberg, J. Equilibrium and Stability of MHD Configurations with Zero Rotational Transform
Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA-CN-35/E9 (1976)
- 123 *Merkel, P.*
Schlüter, A. Das holonome Energieprinzip der Magnetohydrodynamik
Sitzungsberichte der Bayer. Akademie der Wissenschaften, Math. Naturw. Kl, 117(1976)
- 124 *Meyer-Spasche, R.* Numerical treatment of Dirichlet Problems with Several Solutions
ISNM 31, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart (1976)
- 125 *Pfirsch, D.* Energiegewinnung durch Kernfusion in magnetisch eingeschlossenen Plasmen
Phys. Bl. 32, 651 (1976)
- 126 *Rebhan, E.*
Salat, A. Stability of Tokamaks with Respect to Slip Motions
Nucl. Fusion 16, 805 (1976)
- 127 *Rebhan, E.*
Salat, A. Vereinfachte Behandlung des elektrischen Randwertproblems für die vektorielle Poisson-Gleichung
GAMM, Graz, Zusammenfassungen der Kurzvorträge (1976)
- 128 *Rebhan, E.*
Salat, A. Axisymmetric MHD-Instabilities of Doublet-type Plasma Configurations
Proc. of the Annual Meeting on Theoretical Aspects of Controlled Thermonuclear Research, Madison, 1A-15 (1976)
- 129 *Rebhahn, E.*
Salat, A. The Influence of Logarithmic Terms on Tokamak Stability for Large Aspect Ratio
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, p. 1033 (1976)
- 130 *Rebhan, E.*
Salat, A. Shape Optimization of Tokamaks with Elongated Cross-Sections
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, p. 1033 (1976)
- 131 *Saison, R.*
Wimmel, H. K. Numerical and Analytical Results for Anomalous Diffusion in Tokamaks due to the Dissipative Trapped Ion Instability
Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA-CN-35/B15-1 (1976)
- 132 *Sardei, F.*
Düchs, D. Evolution of the Densities of Several Impurity Species Simultaneously Present in Tokamak-like Plasmas
Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA-CN-35/B8-2 (1976)
- 133 *Schwenn, U.* A New Implicit Method for Solving two-dimensional Partial Differential Equations in Plasma Physics
Proc. 2nd European Conf. on Computational Physics, ed. by D. Biskamp, Garching, F1 (1976)
- 134 *Spies, G. O.*
Nelson, D. B. MHD Analysis of Large Scale Instabilities in ELMO Bumpy Torus
Bull. Am. Phys. Soc. II, 21, 3C-3 (1976)

- 135 Tasso, H. Energy Principles for Non-Ideal MHD
Proc. 6th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Res., Berchtesgaden,
IAEA-CN-35/H-1 (1976)
- 136 Wimmel, H. K. New Macroscopic Theory of Anomalous Diffusion
Induced by the Dissipative Trapped-Ion Instability
Plasma Physics 18, 321 (1976)
- 137 Wimmel, H. K. Trapped Ion Depletion by Anomalous Diffusion Due to the Dissipative Trapped-Ion Instability,
Plasma Physics 18, 693 (1976)

Plasma-Wand-Wechselwirkung

- 138 Appleton, B. R.*
Biggerstaff, J. A.*
Noggle, T. S.*
Ritchie, R. M.*
Datz, S.*
Moak, D. C.*
Verbeek, H. Radiative Electron Capture by Highly Stripped Ions in Single Crystal Channels

Nucl. Instr. Meth. 132, 521 (1976)
- 139 Appleton, B. R.*
Ritchie, R. H.*
Biggerstaff, J. A.*
Noggle, T. S.*
Datz, S.*
Moak, C. D.*
Verbeek, H. Energetic Heavy Ion Channeling as an Experimental Technique for Simulating Radiative
Electron Capture by Plasma and Impurity Ion in CTR Type Plasma

J. Nucl. Mat. 63, (1976)
- 140 Bay, H. L.
Andersen, H. H.*
Hofer, W. O. Transmission Sputtering as a Technique for Measuring the Distribution of Energy
Deposited in Solids by Ion Bombardment
Radiation Effects 28, 87 (1976)
- 141 Bay, H. L.
Andersen, H. H.*
Hofer, W. O.
Nielsen, O.* The Energy Dependence of Gold Self Sputtering

Nucl. Instr. Meth. 132, 301 (1976)
- 142 Bay, H. L.
Andersen, H. H.*
Hofer, W. O.
Nielsen, O.* Transmission Sputtering Yields of Gold at 6.8 MeV

Appl. Phys. 11, 289 (1976)
- 143 Bay, H. L.
Andersen, H. H.*
Nielsen, O.*
Hofer, W. O. Stoßkaskadenuntersuchungen mit Hilfe der Zerstäubung dünner Folien:
Beschluß von polykristallinem Gold mit Au⁺-Ionen

Verhandlg. DPG (VI) 11, 588 (1976)
- 144 Behrisch, R. Plasma-Wall Interactions in Proc. Int. Summer School "Tokamak Reactors for Breakeven",
Erice 1976 EUR
Commission of the European Communities (1976)
- 145 Behrisch, R. Fusion-First Wall Problems in "Critical Materials Problems in Energy Production",
ed. by Ch. Stein, Academic Press, New York, p. 91 (1976)
- 146 Behrisch, R.
Bohdansky, J.
Oetjen, G. H.
Roth, J.
Schilling, G.
Verbeek, H. Measurement of the Erosion of Stainless Steel, Carbon and SiC by Hydrogen
Bombardment in the Energy Range of 0.5 – 7.5 keV

J. Nucl. Mat. 60, 321 (1976)
- 147 Behrisch, R.
Risch, M.
Roth, J.
Scherzer, B. M. U. Surface Structure after High Dose Light Ion Bombardment

Proc. 9th Symp. Fusion Technology, Pergamon Press, Oxford, p. 531 (1976)
- 148 Bohdansky, J.
Roth, J.
Poschenrieder, W. P. The Trapping of Hydrogen Ions in Zirconium for Ion Energies between 0.3 and 6 keV

Inst. Phys. Conf. Ser. 28, 307 (1976)

- 149 Bohdansky, J.
Roth, J.
Sinha, M. K. Erosion of Different First Wall and Limiter Materials by Low Energy Hydrogen Ions
Proc. 9th Symp. Fusion Techn., Pergamon Press, Oxford, p. 541 (1976)
- 150 Bohdansky, J.
Roth, J.
Sinha, M. K.
Ottenberger, W. Trapping Coefficient of Energetic Hydrogen (0.3 – 8 keV) in Ti and Zr at High Doses
J. Nucl. Mat. 63, 115 (1976)
- 151 Eckstein, W.
Behrisch, R.
Roth, J. Achievable Depth Resolution in Profiling Light Atoms by Nuclear Reactions
Ion Beam Surface Layer Analysis, Vol. 2, ed. by O. Meyer et al.,
Plenum Publ. Corporation, New York, p. 821 (1976)
- 152 Eckstein, W.
Matschke, P. Energy Distributions and Charge State Fractions of Hydrogen Backscattered from a Gold Surface, Nucl. Instr. Meth. 132, 571 (1976)
- 153 Eckstein, W.
Matschke, F. E. P. Charge State Fractions of Hydrogen Backscattered from Gold.
Phys. Rev. B 14, 3231 (1976)
- 154 Eckstein, W.
Matschke, F. E. P.
Verbeek, H. Reflection of Hydrogen from Stainless Steel and Nb.
J. Nucl. Mat. 63, 199 (1976)
- 155 Haas, G.
Keilhacker, M.
Poschenrieder, W.
Vernickel, H.
Wagner, F. Aspects of Plasma-Wall Interaction in the ASDEX Divertor Experiment
J. Nucl. Mat. 63, 92 (1976)
- 156 Haas, G.
Keilhacker, M.
Poschenrieder, W.
Wagner, F. Divertor Pumping System of ASDEX in Proc. 9th Symp. Fusion Techn.,
Pergamon Press, Oxford, p. 73 (1976)
- 157 Harrison, W. W.
Liebl, H. Untersuchungen einer Jod-Entladung in einem Duoplasmatron,
Verhandlg. DPG (VI) 11, 89 (1976)
- 158 Heiland, W. Special Aspects of Vacuum Systems for Fusion Experiments,
J. Vac. Sci. Techn. 14, 576 (1977)
- 159 Heiland, W. Influence of Surface Structure on Low Energy Noble gas Ion Scattering
Bull. Am. Phys. Soc. 21, 399 (1976)
- 160 Heiland, W.
Taglauer, E.
Robinson, M. T. Multiple Scattering of Low Energy Rare Gas Ions: A Comparison of Experiment and Computer Simulation.
Nucl. Instr. Meth. 132, 655 (1976)
- 161 Hesse, R.
Littmark, U.
Staib, P. A Method of Background Determination in Quantitative Auger Spectroscopy
Appl. Phys. 11, 233 (1976)
- 162 Hofer, W. O.
Liebl, H. Sputtering of Thin Films in an Ion Microprobe
Ion Beam Surface Layer Analysis, Vol. 2, ed. by O. Meyer et al. Plenum
Publ. Corp., New York, p. 659 (1976)
- 163 Hofer, W. O.
Liebl, H.
Roos, G.
Staudenmaier, G. An Electronic Aperture for In-Depth Analysis of Solids with an Ion Microprobe
Int. J. Mass. Spectr. Ion Physics 19, 327 (1976)
- 164 Hofer, W. O.
Littmark, U. Ion and Electron Trajectories in Mirror-Type Ion-Electron Converters.
Nucl. Instr. Meth. 138, 67 (1976)
- 165 Kirschner, J.
Müller, N. A Simple Bakeable Particle Detector: Ion Electron Converter plus Solid State Electron Detector,
Appl. Phys. 11, 179 (1976)
- 166 Liebl, H. A Modified Cylindrical Condenser as Electrostatic Prism
Int. J. Mass Spectr. Ion Physics 22, 203 (1976)
- 167 Liebl, H. Sekundärionen-Massenspektrometrie
Fortschritte der Mineralogie 54, 142 (1976)
- 168 Liebl, H.
Harrison, W. W. Study of an Iodine Discharge in a Duoplasmatron
Int. J. Mass Spectr. Ion Physics 22, 237 (1976)

- 169 *Littmark, U.*
Maderlechner, G. Deposited Energy Distributions with a Surface Discontinuity
Proc. Symp. Phys. Ionized Gases, Dubrovnik, p. 139 (1976)
- 170 *Littmark, U.*
Maderlechner, G.
Behrisch, R.
Scherzer, B. M. U.
Robinson, M. T. Calculations of the Moments and the Range and Damage Distributions for Low keV Light Ion Bombardment of Amorphous Solids
Nucl. Instr. Meth. 132, 661 (1976)
- 171 *Marin, G.*
Taglauer, E.
Heiland, W. Zur Untersuchung der Ionenstoßdesorption mit Ionenstreuung
Verhandlg. DPG (VI) 11, 1009 (1976)
- 172 *Moak, C. D.**
*Appleton, B. R.**
*Biggerstaff, J. A.**
*Brown, M. D.**
*Datz, S.**
*Noggle, T. S.**
*Verbeek** The Velocity Dependence of the Stopping Power of Channeled Iodine from 0.6 to 60 MeV
Nucl. Instr. Meth. 132, 95 (1976)
- 173 *Müller, N.* Spin Polarization in LEED from Au (110)
Bull. Am. Phys. Soc. 21, 944 (1976)
- 174 *Risch, M.*
Behrisch, R.
Roth, J.
Scherzer, B. M. U. Implantationsprofile und Blisterbildung für 30 keV ³He-Ionen als Funktion des Einfallwinkels
Verhandlg. DPG (VI) 11, 632 (1976)
- 175 *Roth, J.*
Behrisch, R. Depth Profiling of Implanted ³He in Solids by Nuclear Reaction and Rutherford Backscattering Ion Beam Surface Layer Analysis. ed. by O. Meyer et al., Plenum Publ. Corp. New York, p. 47 (1976)
- 176 *Roth, J.*
Bohdansky, J.
Poschenrieder, W.
Sinha, M. K. Physical and Chemical Sputtering of Graphite and SiC by Hydrogen and Helium in the Energy Range of 600 to 7500 eV
J. Nucl. Mat. 63, 222 (1976)
- 177 *Roth, J.*
Picraux, S. T.
Eckstein, W.
Böttiger, J.
Behrisch, R. Temperature Dependence of He Trapping in Niobium
J. Nucl. Mat. 63, 120 (1976)
- 178 *Scherzer, B. M. U.*
Behrisch, R.
Eckstein, W.
Littmark, U.
Roth, J.
Sinha, M. K. Temperature Dependence of Trapping and Depth Profiles of 6 to 15 keV Deuterium in Carbon.
J. Nucl. Mat. 63, 100 (1976)
- 179 *Scherzer, B. M. U.*
Behrisch, R.
Roth, J. Wall Erosion by Physical and Chemical Sputtering and Blistering.
In: Proc. Int. Symp. Plasma-Wall Interaction
EUR Commission of European Communities, to be publ. (1977)
- 180 *Scherzer, B. M. U.*
*Børgesen, P.**
*Nicolet, M.-A.**
*Mayer, J. W.** Determination of Stopping Cross Sections by Rutherford Backscattering.
Ion Beam Surface Layer Analysis, Vol. 1, ed. by O. Meyer et al. Plenum Publ. Corp., New York, p. 33 (1976)
- 181 *Seefeld, H. v.*
Schmidl, H.
Behrisch, R.
Scherzer, B. M. U. Sputtering Yields of 1 to 20 keV Light Ions on stainless Steel.
J. Nucl. Mat. 63, 215 (1976)
- 182 *Sinha, M. K.*
Roth, J.
Bohdansky, J. The Temperature Dependence of Trapping of Low Energy Hydrogen in Getter Materials.
Proc. 9th Symp. Fusion Technology, Pergamon Press, Oxford, p. 41 (1976)
- 183 *Staib, Ph.*
Staudenmaier, G. Wall Analysis in PULSATOR 1
J. Nucl. Mat. 63, 37 (1976)
- 184 *Staudenmaier, G.*
Hofer, W. O.
Liebl, H. Cluster Induced Secondary Electron Emission.
Int. J. Mass Spectrom. and Ion Phys. 11, 103 (1976)

- 185 Taglauer, E.
Beitatz, U.
Marin, G.
Heiland, W. Sputtering of Adsorbed Layers by Ion Bombardment.
J. Nucl. Mat. 63, 193 (1976)
- 186 Taglauer, E.
Heiland, W. Surface Analysis with Low Energy Ion Scattering.
Appl. Phys. 9, 261 (1976)
- 187 N. H. Tolk*)
W. Heiland
S. Y. Leung*)
J. Kraus*)
J. C. Tully*) Optical Radiation Produced in Low Energy Ion Surface Scattering Grazing Incidence
Bull. Am. Phys. Soc. Bd. 21, S. 118 (1976)
- 188 Verbeek, H. Backscattering of Ions with Intermediate Energies.
Proc. Advanced Study Institute „Materials Characterization Using Ion Beams“.
- 189 Verbeek, H.
Eckstein, W. Die Reflexion von Plasmateilchen an den Gefäßwänden
Verhandlg. DPG (VI) 11, 201 (1976)
- 190 Verbeek, H.
Eckstein, W.
Datz, S. Positive and Negative Hydrogen Ions Backscattered from Au, Ta, and ThO₂ in the Energy Range up to 15 keV.
J. Appl. Phys. 47, 1785 (1976)
- 191 Vernickel, H. Data Needs for Plasma Surface Interaction.
Proc. IAEA Advisory Group Meeting on Atomic and Molecular Data for Fusion, to be published.
- 192 Vernickel, H. Probleme der Plasma-Wand-Wechselwirkung in Fusionsreaktoren mit magnetischem Einschluß.
Proc. Reaktortagung 1976, ZAED, p. 849 (1976)

Bereich Informatik

- 193 Döderlein, A.
Hertweck, F. On the Exchange of Messages between Processes;
Fachtagung der GI und NTG über Rechnernetze und Datenfernverarbeitung, Aachen, Reihe Informatik-Fachberichte 3 (1976)
- 194 Hertweck, F. Command Languages as the User's Interface to the Computer System
Proc. of the 1976 CERN School of Computing, ed. by CERN, Genf, pp. 141-160 (1976)

Bereich Relativistische Plasmen

- 195 Andelfinger, C. Status of the Investigations of Electron Ring Accelerator and Future Accelerators
Proc. 2nd Symposium on Collective Methods of Acceleration, Dubna, UdSSR (1976)
- 196 Dommaschk, W. Radial Electron-Ion Oscillations Obtained for a Nonlinear Center of Mass Coupling Force
Proc. 2nd Symposium on Collective Methods of Acceleration, Dubna, UdSSR (1976)
- 197 Herrmann, W. Design and Construction of the New Electron Ring Accelerator „Pustarex“ and Accompanying Experiments
Proc. 2nd Symposium on Collective Methods of Acceleration, Dubna, UdSSR (1976)
- 198 Hofmann, I. Toroidal Effects on Coherent Radial and Azimuthal Oscillations of a Relativistic Electron Ring
Proc. 2nd Symposium on Collective Methods of Acceleration, Dubna, UdSSR (1976)
- 199 Merkel, P.
Schlüter, A. „Das Holonome Energieprinzip der Magnetohydrodynamik“, vorgelegt bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften am 2. Juli 1976 (Sitzungsberichte)
- 200 Merkel, P. Ohmic Losses of a Relativistic Electron Ring Moving Along a Conducting Cylinder
Particle Accelerators, 7, pp. 69-76 (1976)
- 201 Merkel, P. "Stopping of a Relativistic Electron Ring by Image Currents in a Resistive Cylinder"
Proc. 2nd Symposium on Collective Methods of Acceleration, Dubna, UdSSR (1976)
- 202 Schumacher, U.
Hofmann, I.
Merkel, P.
Reiser, M.*) Deceleration of Electron Rings by Ions
Particle Accelerators, 7, p. 245 (1976)
- 203 Schumacher, U.
Ulrich, M. Experiments with Accelerated Electron Rings
Proc. 2nd Symposium on Collective Methods of Acceleration, Dubna, UdSSR (1976)

*) Gastforscher

- 204 *Schumacher, U.* Electron Ring Accelerator and Collective Instabilities
Ulrich, M.
Dommaschk, W. Proc. First Int. Conf. on Electron Beam Research and Technology, Albuquerque, 1975, Vol. II,
Hofmann, I. p. 385 (1976)
Merkel, P.
- Bereich Technologie**
- 205 *Bäumler, J.* The Wendelstein W7A Injection system
Junker, J.
Melkus, W. Proc. 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602,
Ott, W. p. 801 (1976)
Probst, F.
Speth, E.
- 206 *Baumhacker, H.* Experiments for filling magnetic confinement machines with laser-produced plasmas
Brinkschulte, H. Proc. 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602,
Lang, R. p. 873 (1976)
Riedmüller, W.
- 207 *Baumhacker, H.* Deuterium pellet fabrication with low divergence of the pellet trajectories
Riedmüller, W. Bulletin Am. Phys. Soc., Ser. II 21, 9, p. 1137 (1976)
- 208 *Baumhacker, H.* Plasma production by irradiation of freely falling solid deuterium pellets with a Nd laser
Brinkschulte, H.
Lang, R. S. Bulletin Am. Phys. Soc., Ser. II 21, 9, p. 1127 (1976)
Riedmüller, W.
Salvat, M.
- 209 *Baumhacker, H.* Erzeugung von Plasma durch Beschuß freifallender Deuteriumsp pellets mit einem
Brinkschulte, H. Neodymlaser
Lang, R. S. Verhandlungen der DPG (VI) 11, p. 223 (1976)
Riedmüller, W.
- 210 *Bünde, R.* 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602
 Brennstoff-Wärme-Kraft 28 (1976), Nr. 10, S. 401 (1976)
- 211 *Carruthers, R.¹⁾* Fusion Power in the EEG – Some Considerations Concerning the Future Programme
Schmitter, K. H. Proc. 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602, p. 529 (1976)
- 212 *Dänner, W.* Technologie der Fusionsreaktoren
 Bericht über das 9. Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen
 „Atomwirtschaft“, 12, (1976)
- 213 *Dänner, W.* A New Approach to the Problem of Blanket Replacement in Tokamak Fusion Reactors
 Proc. 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602, p. 441 (1976)
- 214 *Dänner, W.* Controlled Fusion in Germany – Running Activities and Future Programme.
Schmitter, K. H. Proc. 1976 ASME/ANS Intern. Conference on Advanced Nuclear Energy Systems,
 Pittsburg (1976)
- 215 *Darvas, J.³⁾* Energy Balance and Efficiency of Power Stations with a Pulsed Tokamak Reactor
Davenport, P. A.¹⁾
Förster, S.³⁾
Knobloch, A.
Mitchell, J.¹⁾
Sack, B.³⁾ KFA-Bericht, Jülich, Jül-1304 (1976)
- 216 *Feist, J. H.* Neutral injection heating in Wendelstein VII A Stellarator
Junker, J.
Ott, W.
Speth, E. Proc. 3rd. Int. Meeting on Theoretical and Experimental Aspects of Heating of Toroidal plasmas,
Wobig, H. ed. by T. Consoli, Grenoble, Vol. 1, p. 17–24 (1976)
- 217 *Feist, J. H.* Heating of Wendelstein VII A stellarator by neutral injection
Ott, W. Proc. 3rd Symp. on Plasma Heating in Toroidal Devices, Varenna (1976)
Speth, E.
- 218 *Feist, J. H.* Effect of neutral injection heating on the impurity level in the Wendelstein VII A stellarator
Ott, W. Proc. Internat. Symp. on Plasma Wall Interaction, Jülich (1976)
Speth, E.

¹⁾ UKAEA Culham Laboratory, Abingdon, England, ²⁾ Kernforschungszentrum Karlsruhe, ³⁾ KFA Jülich

- 219 Haas, G. Additional heating and refuelling for the ASDEX divertor tokamak
Henkes, W.²⁾
Keilhacker, M.
Klingelhöfer, R.²⁾
Stäbler, A. Proc. 3rd Symp. on Plasma Heating in Toroidal Devices, Varenna (1976)
- 220 Herold, H. Auswirkungen plasmaphysikalischer Probleme auf Entwurf, Betriebsweise und Wirtschaftlichkeit von D-T-Fusionsreaktoren
Reaktortagung 1976, Düsseldorf, S. 841 (1976)
- 221 Knobloch, A. F. Superconducting Magnet Systems in EPR Designs
International School of Fusion Reactor Technology (3rd course), Erice (1976)
- 222 Knobloch, A. F. Technical Limitations on Conceptual Tokamak Reactors (Part II)
Proc. 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602, p. 421 (1976)
- 223 Lengyel, L. L. Füllung von magnetischen Einschlußanordnungen mit lasererzeugten Plasmen
Verhandlungen der DPG (VI) 11, p. 222 (1976)
- 224 Lengyel, L. L. Numerical calculations on the effect of wavelength and multiple pulse heating of laser produced deuterium plasmas
Bulletin Am. Phys. Soc., Ser. II, 21, p. 1127 (1976)
- 225 Lengyel, L. L. On multi-pulse heating of laser-produced plasmas in magnetic fields
Proc. 6th Intern. Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Res., Berchtesgaden, IAEA-CN-35/G3-2 (1976)
- 226 Salvat, M. The production of solid hydrogen isotope pellets, their interactions with lasers and the problem of filling magnetic confinement configurations with laser produced plasmas
Proc. Intern. Workshop Conference at the Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N. Y. (1976)
- 227 Schmitter, K. H. Proceedings of the 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen,
(Editor) Published for the Commission of the European Communities by Pergamon Press.
- 228 Schmitter, K. H. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, Summary on Reactor Systems
Nuclear Fusion 16, 1060-1062 (1976)
- 229 Stäbler, A. On the refuelling of large divertor experiments
Haas, G.
Ott, W.
Speth, E. Proc. 3rd Int. Meeting on Theoretical and Experimental Aspects of Heating of Toroidal Plasmas, ed. by T. Consoli, Grenoble, Vol. 1, p. 49 (1976)
- 230 Söll, M. Change of the superconducting critical parameters of Nb₃Sn by low temperature neutron irradiation
Bönig, K.¹⁾
Bauer, H.²⁾ Proc. 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602, p. 169 (1976)

Zentrale Technische Einrichtungen

- 231 Bäuml, J. The Wendelstein VII Injection System
Junker, J.
Melkus, W.
Ott, W.
Probst, P.
Speth, E. Proc. of the 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602, (1976)
- 232 Breit, E. A Modular Power-Crowbar Bank for the Generation of a 50 MA, 50 μ sec Current Pulse for the Toroidal Plasma Experiment HBS II at Garching
Gruber, J. E.
Münich, M.
Schramm, G.
Seidel, U.
Süß, R. Proc. of the IEEE Intern. Pulsed Power Conference Lubbock, Texas, USA (1976)
- 233 Hofer, W. O. An Electronic Aperture for In-Depth Analysis of Solids with an Ion Microprobe
Liebl, H.
Roos, G.
Staudenmaier, G. Intern. J. Mass Spectrom. a. Ion Phys. 19, 327 (1976)

¹⁾ Physik-Department der Technischen Universität München

²⁾ Institut für Angewandte Physik der Universität Gießen

- 234 *Knobloch, A.*
Kottmair, M.
Schlüter, M.
Vau, G. Large Flywheel Power Supply for Fusion Experiments in the Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching
Energy Storage. ed. by R. B. Lindsay and O. K. Mawardi (1976)
- 235 *Melkus, W.* High Voltage Protection of High Power Ion Sources by Fast Vacuum Tube Switches Proc. 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602, p. 821 ff (1976)
- 236 *Melkus, W.* Patent: Anordnung zur Hebung des Gleichstrom-Ausnutzungsgrades von Vakuum-Leistungsröhren
D.P.A. – P 2616 785.1 (1976)
- 237 *Voigt, P.* Gebrauchsmuster: Lichtleiterkupplung
GB: 7519 901 und USA: 697,692
- 238 *Weichselgartner, H.*
Perchermeier, J. A Model Experiment on Tritium Recovery
Proc. 9th Symposium on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen, EUR 5602, p. 351 ff (1976)

DIPLOMARBEIT

- 239 *Wrobel, W.-G.* Resonanz- und Rayleighstreuung am Neutralgas in Plasmen
Technische Universität München (1976)

DISSERTATIONEN

- 240 *Preis, H.* Berechnung des magnetischen Feldes, der magnetischen Kräfte und des Betriebsverhaltens großer Spulensysteme für Fusionsexperimente
Technische Universität München und IPP-Report III/24 (1976)
- 241 *Söldner, F.* Untersuchung der Stoßwellenkompression in toroidaler Geometrie am Hochspannungs-Belt-Pinch
Technische Universität München (1976)

LABORBERICHTE

- IPP 1/161 *Herrnegger, F., Schneider, W.:* Ideal MHD Stability of $m \geq 2$ Modes in Diffuse High-Beta $\ell = 1$ Equilibria (1976)
- IPP 1/157 *Röhr, H.:* Laserlichtstreuung bei sehr hohem Falschlichtuntergrund (1976)
- IPP 1/160 *Wrobel, W.-G.:* Resonanz- und Rayleighstreuung am Neutralgas in Plasmen (1976)
- IPP 2/231 *Jäckel, H., Kiblinger, J., Rau, F.:* Magnetic Surfaces of the W VII A Stellarator.
- IPP 2/230 *Kisliakov, A. I., Mayer, H. M., Ott, W., Wagner, F.:* Neutral Particle Emission of the Pulsator Plasma.
- IPP 2/229 *Javel, P., Müller, G., Weber, U., Weynants, R.:* Plasma Production and Parametric Heating by Means of Electron Plasma Waves in the W II A Stellarator.
- IPP 2/232 *Rehker, S.:* Kinetische Beschreibung der Neutralteilchenrandschicht.
- IPP 6/142 *Tasso, H.:* Cole's Ansatz and Extensions of Burgers' Equation (1976)
- IPP 6/143 *Tasso, H., Steuerwald, I.:* Subroutine for Series Solutions of Linear Differential Equations (1976)
- IPP 6/144 *Saison, R., Wimmel, H. K.:* Some Analytical Properties of the Trapped-ion Transparent Equations of Kadomtsev and Pogutse (1976)
- IPP 6/147 *Biskamp, D.:* Computing in Plasma Physics and Astrophysics – Proceedings of the 2nd European Conference on Computational Physics. Contributed Papers (1976)
- IPP 6/149 *Rebhan, E., Salat, A.:* Stability of Tokamaks with Respect to Slip Motions (1976)
- IPP 6/149 *Tasso, H.:* Energy Principle for Resistive Perturbations in Tokamaks (1976)
- IPP 6/150 *Rebhan, E., Salat, A.:* Axisymmetric MHD Stability of Sharp-boundary Tokamaks (1976)
- IPP 6/151 *Tasso, H.:* On the Stability of Force-free Fields (1976)
- IPP 6/152 *Gräff, P., Scherer, C.:* Compound Stochastic Processes (1976)
- MATT-1272 *Rutherford, P. H., Düchs, D. F.:* A Computer Model of Radial Transport in Tokamaks (1976)
Düchs, D., Pfirsch, D.: Neutral Gas Influx in JET, Report on JET-Workshop on High Density Tokamak Result and Implications for JET, Culham (1976)
- PNL *Behrisch, R., Harling, O. K. *), Thomas, M. T. *), Brodzinski, R. L. *), Jenkins, L. H. *), Smith, G. J. *), Wendelhen, J. F. *), Saltmarsh, M. J. *), Kaminsky, M. *), Das, S. K. *), Logan, C. M. *), Meisenheimer, R. *), Robinson, J. E. *), Shinotomai, M. *), Thompson, D. A. *):* Sputtering of Niobium by Energetic Neutrons and Protons: A Round Robin Experiment. Battelle-Northwest, Laboratory Report PNL (1976)
- IPP 9/20 *Maderlechner, G.:* Computersimulation von Reichweiten- und Schadenverteilungen von 0.5 bis 8 keV Heliumionen in kristallinem und amorphem Niob (1976)
- IPP 9/21 *Littmark, U.:* The Programm RADELI for Evaluation of the Moments over the Range- and Deposited Energy-Distribution for Light Ion Bombardment of Solids (1976)
- IPP R/19 *Kottmann, K., Engelhardt, K., Lathe, R., Müller, E.:* Beschreibung einer Namelist-Routine für RSX-11M (1976)
- IPP 0/30 *Andelfinger, C., Buchelt, E., Dommaschk, W., Fink, J., Herrmann, W., Hofmann, I., Jacobi, D., Merkel, P., Schilling, W., Schlüter, A., Schumacher, U., Ulrich, M.:* „PUSTAREX, Experiment zur kollektiven Ionenbeschleunigung“ (1976)
- IPP 0/31 *Schumacher, U., Hofmann, I., Merkel, P., Reiser, M. *):* Deceleration of Electron Rings by Ions (1976)
- IPP 0/32 *Schumacher, U., Ulrich, M.:* Electron Ring Diagnostics with Magnetic Probes during Roll-out and Acceleration (1976)

*) Kein Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, Garching

- IPP 0/33 *Hofmann, I.*: Coherent Oscillations of a Ring of Relativistic Particles (1976)
- IPP 4/137 *Perry, R. T., Gorenflo, H., Dänner, W.*: INDRA: A Program System for Calculating the Neutronics and Photonics Characteristics of a Fusion Reactor Blanket (1976)
- IPP 4/139 *Knobloch, A. F.*: Technical Limitations on Conceptual Tokamak Reactors – Part II (1976)
- IPP 4/140 *Borraß, K.*: The Influence of the Radial Density and Temperature on the Mean Fusion Power Density in a Tokamak (1976)
- IPP 4/141 *Raeder, J.*: Some Analytical Results for Toroidal Magnetic Field Coils with Elongated Minor Cross-Sections (1976)
- IPP 4/142 *Söll, M., Jandl, O., Gorenflo, H.*: Mechanical Stress Calculations for Toroidal Field Coils by the Finite Element Method (1976)
IPP III/31
- IPP 4/113 *Dänner, W.*: The Mechanical Performance on the Fusion Reactor First Wall. Part I: Steady-state Analysis without Irradiation Effects (1976)
- IPP 4/144 *Knobloch, A. F.*: Superconducting Magnet Systems in EPR Designs (1976)
- IPP 4/145 *Söll, M.*: Comparison of some Analytically and Numerically Calculated Parameters for Toroidal Field Coils (1976)
- IPP 4/147 *Bünde, R., Dänner, W., Herold, H., Raeder, J.*: Energie durch Kernfusion. Physikalische Grundlagen, Energie-reserven, Stand der Plasmaphysik, Reaktorenentwürfe, Schlüsselprobleme, Kostenaspekte, Sicherheit und Umweltbeeinträchtigungen (1976)
- IPP 2/230 *Kisliakov, A. I., Mayer, H. M., Ott, W., Wagner, F.*: Neutral particle Emission of the PULSATOR plasma (1976)
IPP III/25

Interne Berichte – Systemstudien

Dänner, W.: Fundamental material for stainless steel activation calculations. Bericht Nr. 6 (1976)

Borraß, K.: The influence of the radial density and temperature profiles on the mean fusion power density in a tokamak. Bericht Nr. 7 (1976)

Bünde, R.: Cost structure of electric energy from fusion power plants – Review and evaluation of data from the literature –. Bericht Nr. 8 (1976)

Söll, M.: Basic considerations in designing superconducting toroidal field coils for fusion reactors (Part I). Bericht Nr. 9 (1976)

Bünde, R., Dänner, W., Herold, H., Raeder, J.: ENERGIE DURCH KERNFUSION – Physikalische Grundlagen, Energiereserven, Stand der Plasmaphysik, Reaktorenentwürfe, Schlüsselprobleme, Kostenaspekte, Sicherheit und Umweltbeeinträchtigungen. – Bericht Nr. 10 (1976)

Autorenverzeichnis 1976

Andelfinger, C.	195, 0/30 (Lab.-Ber.)
Andersen, H. H.*)	140, 141, 142, 143
Appleton, B. R.*)	138, 139, 172
Bäumler, J.	27, 205, 231,
Bauer, H.*)	230
Baumhacker, H.	206, 207, 208, 209
Bay, H. L.	140, 141, 142, 143
Becker, G.	1, 2, 3, 50, 51, 111, 112
Beitatz, U.	185
Behrisch, R.	144, 145, 146, 147, 151, 170, 174, 175, 177, 178, 179, 181, MATT-1272, PNL (Lab.-Ber.)
Bernardini, M.	102
Bescher, G.	28
Biggerstaff, J. A.*)	138, 139, 172
Biskamp, D.	113, 114, 115, 6/147 (Lab.-Ber.)
Blanc, P.	29, 30, 31, 32, 33
Blaumoser, M.	48, 49
Bönig, K.*)	230
Bohdansky, J.	146, 148, 149, 150, 176, 182
Bombi, F.	98, 99
Børgesen, P.*)	180
Borraß, K.	4/140 (Lab.-Ber.), Interner Ber. No. 7
Bøttiger, J.	177
Braunsberger, U.*)	34
Breit, E.	4, 232
Brinkschulte, H.	206, 208, 209
Brodzinski, R. L.*)	MATT-1272
Broser, E.	52
Brown, M. D.*)	172
Buchelt, E.	0/30 (Lab.-Ber.)
Bünde, R.	210, 4/147 (Lab.-Ber.), Interner Ber. No. 8, Interner Ber. No. 10

*) Kein Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, Garching

Cannici, B.	53, 54, 63, 67, 72, 78
Carruthers, R.*)	211
Cattanei, G.	35, 48, 49
Cavallo, A.*)	48, 49
Chang, R. P. H.*)	89, 90
Chodura, R.	5, 116
Ciscato, D.	98, 99
Clerc, H.	109
Congiu, S.	98, 99
Conte, S. D.	84
Croci, R.	35
Dänner, w.	212, 213, 214, 4/137 (Lab.-Ber.), 4/113 (Lab.-Ber.), 4/147 (Lab.-Ber.), Interner Ber. No. 6, Interner Ber. No. 10
Darvas, J.	215
Das, S. K.*)	MATT-1272
Datz, S.*)	138, 139, 172, 190
Davenport, P. A.	215
Derfler, H.	36, 37, 43, 82, 83, 86, 87, 88, 96
Döderlein, A.	193,
Dommaschk, W.	196, 204, 0/30 (Lab.-Ber.)
Dorst, D.	48, 49
Düchs, D. F.	1, 6, 111, 112, 117, 118, 120, 132, MATT-1272
Dum, C. T.	119
Eckhartt, D.	100, 101, 102, 103, 103a, 104
Eckstein, W.	151, 152, 153, 154, 177, 178, 189, 190
Elsner, H.	48, 49
Engelhardt, K.	R/19 (Lab.-Ber.)
Engelhardt, W.	53, 54, 55, 63, 67, 72, 78,
Feist, J. H.	38, 216, 217, 218
Finck von Finckenstein, K. Graf	120
Fink, J.	0/30 (Lab.-Ber.)
Förster, S.	215
Forth, H. J.	107, 108
Frank, R.	107, 108
Friedl, B. D.	84
Fritsch, R.	39
Fußmann, G.	53, 54, 63, 68, 72, 78
Galeev, A. A.	95
Gehre, O.	36, 96
Gernhardt, J.	53, 54, 63, 67, 72, 78
Gibson, A.	57
Glock, E.	53, 54, 63, 67, 72, 78
Gorenflo, H.	4/137 (Lab.-Ber.), 4/142, III/31 (Lab.-Ber.)
Gräff, P.	6/152 (Lab.-Ber.)
Green, B. J.	56, 57, 104
Gresser, F.	74, 76
Groening, D. E.	54, 63
Gruber, J. E.	4, 7, 232
Gruber, O.	3, 8, 9, 10, 51

Haas, G.	58, 59, 60, 61, 80, 155, 156, 219, 229
Hacker, H.	48, 49
Harling, O. K.*)	MATT-1272
Harrison, W. W.	157, 168
Hartz, F.	62
Heiland, W.	158, 159, 160, 171, 185, 186, 187
Henkes, W.*)	59, 219
Herold, H.	220, 4/147 (Lab.-Ber.), Interner Ber. No. 10
Herrmann, W.	197, 0/30 (Lab.-Ber.)
Hernegger, F.	11, 12, 13, 1/161 (Lab.-Ber.)
Hertweck, F.	193, 194
Hess, W.	29, 30, 31, 33
Hesse, R.	161
Hofmann, I.	198, 202, 204, 0/30 (Lab.-Ber.), 0/31 (Lab.-Ber.), 0/33 (Lab.-Ber.)
Hofer, W. O.	140, 141, 142, 143, 162, 163, 164, 184, 233
Ichtchenko, G.	29, 30, 31, 32
Jacobi, D.	0/30 (Lab.-Ber.)
Jacquinet, J.	57
Jaeckel, H.	48, 49, 2/231 (Lab.-Ber.)
Jaenicke, R.	48, 49
Jandl, O.	4/142, III/31 (Lab.-Ber.)
Javel, P.	29, 30, 31, 47, 2/229 (Lab.-Ber.)
Jenkins, L. H.*)	MATT-1272
Jensen, K.	107, 108
Junker, J.	27, 38, 48, 49, 205, 216, 231
Kaminsky, M.*)	MATT-1272
Kargel, F.	53, 54, 63, 67, 68, 72, 78
Kaufmann, M.	11, 14
Keilhacker, M.	58, 59, 60, 61, 64, 65, 155, 156, 219
Kick, M.	48, 49
Kirschner, J.	165
Kisliakov, A. I.	2/230 (Lab.-Ber.), 2/230, III/25 (Lab.-Ber.)
Kißlinger, H.	2/231 (Lab.-Ber.)
Klingelhöfer, R.	59, 219
Klipping, G.	107, 108
Klüber, O.	53, 54, 63, 66, 67, 68, 72, 78
Knobloch, A. F.	215, 221, 222, 234, 4/139 (Lab.-Ber.), 4/144 (Lab.-Ber.)
Köppendörfer, W.	15
Kottmair, M.	234
Kottmann, K.	R/19 (Lab.-Ber.)
Kraus, J.*)	187
Krause, H.	3, 8, 9, 16, 51
Kunze, R.-C.	48, 49
Lackner, K.	2, 3, 50, 51, 57, 63, 69, 70, 71
Lallia, P.	29, 30, 31, 33, 40
Lang, R.	206, 208, 209
Langer, H.	17
Lathe, R.	R/19 (Lab.-Ber.)
Lengyel, L. L.	223, 224, 225

Lentges, G.	108
Leung, S. Y.*)	187
Leuterer, F.	36, 37, 41, 42, 43, 48, 49, 85, 86, 87, 88, 94, 96
Liebl, H.	157, 162, 163, 166, 167, 168, 184, 233
Lipa, M.	39
Littmark, U.	161, 164, 169, 170, 178, 9/21 (Lab.-Ber.)
Lisitano, G.	53, 54, 63, 67, 72, 78
Logan, C. M.*)	MATT-1272
Lortz, D.	11, 121, 122
M aderlechner, G.	169, 170, 9/20 (Lab.-Ber.)
Mahn, C.	29, 30, 31, 32, 33
Marin, G.	171, 185
van Mark, E.	34, 48, 49
Marlier, S.	
Mast, F.	3, 8, 9, 51
Matschke, P.	152, 153, 154
Mayer, H. M.	36, 53, 54, 63, 67, 72, 78, 81, 96, 2/230 (Lab.-Ber.), 2/230, III/25 (Lab.-Ber.)
Mayer, J. W.*)	180
McCormick, K.	53, 78
Meisel, D.	53, 54, 63, 67, 72, 78
Meisenheimer, R.*)	MATT-1272
Melkus, W.	27, 205, 231, 235, 236
Merkel, P.	123, 199, 200, 201, 202, 204, 0/30 (Lab.-Ber.), 0/31 (Lab.-Ber.)
Meyer-Spasche, R.	124
Mitchell, J.	215
Moak, D. C.*)	138, 139, 172
Morandi, P.	53, 54, 63, 67, 72, 78
Müller, E.	R/19 (Lab.-Ber.)
Müller, G.*)	21
Müller, G.	48, 49, 2/229 (Lab.-Ber.)
Müller, G. A.	34
Müller, N.	165, 173
Münich, M.	4, 15, 232
N eslon, D. B.	134
Neuhauser, J.	11, 14
Nguyen, T. K.	29, 30, 31, 33, 46
Nicolet, M.-A.*)	180
Nielsen, O.*)	141, 142, 143
Noggle, T. S.*)	138, 139, 172
Noll, P.	98, 99
Nührenberg, J.	11, 121, 122
O etjen, G. H.	146
Ohlendorf, W.	29, 30, 31, 33, 39
Ono, M.*)	89, 90
van Oordt, A.	48, 49
Ott, W.	27, 38, 80, 205, 216, 217, 218, 229, 231, 1/230 (Lab.-Ber.), 2/230, III/25 (Lab.-Ber.)
Ottenberger, W.	150

Pacher, G. W.	29, 30, 31, 33, 39, 40, 44
Pacher, H. D.	29, 30, 31, 33, 39, 40, 44
Peratt, A. L.	93, 97
Perchermeier, J.	238
Perry, R. T.	4/137 (Lab.-Ber.)
Pfirsch, D.	125, MATT-1272
Picraux, S. T.	177
Poehlchen, R.	105, 105a
Porkolab, M.	89, 90, 91, 92
Poschenrieder, W.	58, 61, 148, 155, 156, 176
Preis, H.	73, 240 (Dissert.)
Probst, F.	27, 205, 231
Puri, S.	41, 42, 85, 94
Raeder, J.	4/141 (Lab.-Ber.), 4/147 (Lab.-Ber.), Interner Ber. No. 10
Rapp, H.	74, 75
Rau, F.	48, 49, 2/231 (Lab.-Ber.)
Rebhan, E.	126, 127, 128, 129, 130, 6/149 (Lab.-Ber.) 6/150 (Lab.-Ber.)
Rebut, P. H.	104
Rehker, S.	48, 49, 2/232 (Lab.-Ber.)
Reiser, N.*)	202, 0/31 (Lab.-Ber.)
Renner, H.	48, 49
Riedmüller, W.	206, 207, 208, 209
Ringler, H.	48, 49
Risch, M.	147, 174
Ritchie, R. M.*)	138, 139
Robinson, J. E.	MATT-1272
Robinson, M. T.	160, 170
Röhr, H.	14, 17, 24, 25, 1/157 (Lab.-Ber.)
Roos, G.	163, 233
Roth, J.	146, 147, 148, 149, 150, 151, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 182
Rutherford, P. H.	MATT-1272
Sack, B.	215
Saffert, J.	48, 49
Sagdeev, R. Z.	95
Saison, R.	131, 6/144 (Lab.-Ber.)
Salat, A.	126, 127, 128, 129, 130, 6/149 (Lab.-Ber.) 6/150 (Lab.-Ber.)
Saltmarsh, M. J.*)	MATT-1272
Salvat, M.	208, 226
Sapper, J.	48, 49
Sardei, F.	132
Seefeld, H. V.	181
Seidel, U.	4, 232
Sesnic, S.	53, 54, 63, 67, 72, 77, 78, 79
Shinotomai, M.*)	MATT-1272
Sinha, M. K.	149, 150, 176, 178, 182
Smeulders, P.	48, 49
Smith, G, J.*)	MATT-1272

Snykers, M.	102
Söldner, F.	18, 19, 20, 21, 241 (Dissert.)
Söll, M.	230, 4/142, III/31 (Lab.-Ber.), 4/145 (Lab.-Ber.), Interner Ber. No. 9
Sommer, J.	15
Speth, E.	27, 38, 80, 205, 216, 217, 218, 229, 231
Spies, G. O.	134
Süß, R.	4, 232
Scherer, C.	6/152
Scherzer, B. M. U.	147, 170, 174, 178, 179, 180, 181
Schilling, H.-B.	146, 0/30 (Lab.-Ber.)
Schlüter, A.	5, 116, 123, 199, 0/30 (Lab.-Ber.)
Schlüter, M.	234
Schmidl, H.	181
Schmitter, K. H.	211, 214, 227, 228
Schneider, F.	76
Schneider, W.	6, 11, 12, 13, 117, 1/161 (Lab.-Ber.)
Schramm, G.	4, 11, 232
Schumacher, U.	202, 203, 204, 0/30 (Lab.-Ber.), 0/31 (Lab.-Ber.), 0/32 (Lab.-Ber.)
Schwenn, U.	133
Stäbler, A.	59, 80, 219, 229
Staib, P.	161, 183
Staudenmaier, G.	163, 183, 184, 233
Steuer, K.-H.	17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25
Streibl, B.	45, 106
Taglauer, E.	160, 171, 185, 186
Takamura, S.	29, 30, 31, 46, 47
Tasso, H.	135, 6/142 (Lab.-Ber.), 6/143 (Lab.-Ber.), 6/149 (Lab.-Ber.), 6/151 (Lab.-Ber.)
Thomas, M. T.*)	MATT-1272
Thompson, D. A.*)	MATT-1272
Thumm, M.*)	21
Tolk, N. H.*)	187
Tonon, G.	29, 30, 31, 32, 33
Tully, J. C.*)	187
Tutter, M.	36, 41, 42, 48, 49, 85, 94, 96
Ulrich, M.	203, 204, 0/30 (Lab.-Ber.), 0/32 (Lab.-Ber.)
Vau, G.	234
Venus, G.	107, 108, 109, 110
Verbeek, H.	138, 139, 146, 154, 172, 188, 189, 190
Vernickel, H.	61, 155, 191, 192
Voigt, P.	237
Wagner, F.	53, 54, 58, 61, 63, 67, 72, 78, 81, 155, 156, 2/230 (Lab.-Ber.), 2/230, III/25 (Lab.-Ber.)
Warich, L.*)	21
Watterson, R. L.	93, 97
Weber, U.	2/229 (Lab.-Ber.)
Wedler, H.	73

Wegrowe, J.-G.	29, 30, 31, 32, 33, 39
Weichselgartner, H.	238
Weller, A.	48, 49
Welter, H.	113, 114
Wendelhen, J. F.*)	MATT-1272
Weynants, R.	2/229 (Lab.-Ber.)
Wilhelm, R.	3, 8, 9, 10, 26, 51
Wimmel, H. K.	131, 136, 137, 6/144 (Lab.-Ber.)
Wobig, H.	38, 48, 49, 216
Würsching, E.	48, 49
Wrobel, W.-G.	17, 23, 24, 25, 239 (Dipl.-Arb.), 1/160 (Lab.-Ber.)
Zehrfeld, H. P.	54, 56, 63
Zimmermann, D.	98, 99
Zippe, M.	48, 49
Zwicker, H.*)	21

Institut für Elementarforschung (IEF)
der Universität Stuttgart
Postfach 4015
70509 Stuttgart

Projekte des IPP an Hochschulen

Institut für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart

(Prof. Dr. Hartmut Zwickler)

Im Berichtsjahre wurden die mit dem IPP vereinbarten und auf dessen wissenschaftliches Programm abgestimmten Arbeiten weitergeführt. Hierbei wurde die Zusammenarbeit durch stetige Kontakte zwischen dem IPF und den Garchingern Mitgliedern des gemeinsamen Programmausschusses weiter intensiviert.

Zur sinnvollen Ergänzung des Programms wurde das Hochspannungs-Belt-Pinch-Experiment in Zusammenarbeit mit dem IPP ab Mitte 1976 in Garching von einem Team des IPF weitergeführt. Nach Einbau und Inbetriebnahme des Crowbarsystemes wurde hier die Einstellung des radialen Belt-Pinch-Gleichgewichtes studiert und abgeschlossen. Parallel hierzu wurde die Übernahme des Experiments nach Stuttgart vorbereitet. Diese zusätzlichen Aktivitäten wurden durch Einschränkungen vor allem in den Arbeiten zur Kurzzeittechnik ermöglicht.

Im Bereich Wellen und Plasmaheizung wurde das Θ -Pinch-Experiment fertiggestellt und in Betrieb genommen. Beschaffungsschwierigkeiten und Studien zur Vorionisierung bei sehr kleinen Fülldrücken ($p_0 \approx 2$ m Torr) führten hier zu geringen Verzögerungen hinsichtlich des vorgesehenen Zeitplans.

Die Arbeiten zur Ausbreitung von linearen Alfvénwellen wurden auf nicht-axial-symmetrische Wellentypen erweitert. Der Vergleich zwischen Theorie und Experiment wurde durch Entwicklung numerischer Programme vorbereitet. Die Experimente zur Dämpfung nichtlinearer Torsions-Alfvén-Wellen wurden in den stark nichtlinearen Bereich verlagert, wobei neue axiale Feldkomponenten gefunden wurden.

Nach Abschluß der Untersuchungen zur Plasmaerzeugung durch Mikrowellen wurde mit dem Aufbau einer neuen linearen Anordnung begonnen; sie dient dem Studium der Wellenankoppelung an stromführenden Plasmen.

Im Bereich Laseranwendungen konnten für die zeitaufgelöste Streudiagnostik die theoretisch erwarteten Vorteile bei periodisch gepulstem Betrieb des Lasers durch direkten Vergleich zwischen CW-Argon-Ionenlaser und periodisch gepulstem, frequenzverdoppeltem YAG-Laser experimentell verifiziert werden. Die Entwicklung eines für höhere Zeitauflösung geeigneten periodisch spikenden Rubinlasers wurde weitergeführt und steht vor dem Abschluß.

Für die stationäre Streuung im IR ($10,6 \mu$) gelang nach Verbesserung des Empfängersystemes die spektral aufgelöste Messung der Ionenlinie am magnetfeldstabilisierten Hochstrombogen.

Für die gepulste Streudiagnostik bei $10,6 \mu$ mit Überlagerungsempfang konnten nach Verbesserung des Justierverfahrens erste Resultate zur Messung des thermischen Spektrums am Hochstrombogenplasma erzielt werden.

Die Entwicklung eines stationären single-mode-CO₂-Lasers für die zeitaufgelöste (stationäre) Streuung im IR mit Überlagerungsempfang wurde fortgesetzt. Der erforderliche single-mode-Betrieb konnte bei erhöhter Leistung und verringerter Strahldivergenz realisiert werden.

Für die FIR-Diagnostik wurde die pyroelektrische Kamera im Wellenlängenbereich zwischen $\lambda = 66 \mu$ und 385μ als zweidimensionaler FIR-Detektor in ihrer Nachweisempfindlichkeit weiter untersucht.

Im Bereich Kurzzeittechnik konnte für die Hochdruck-Stickstoff-Laser bei Betrieb mit 15 bar nur eine Impulsverkürzung auf $\tau = 40$ psec erreicht werden. Die Ursachen hierfür wurden geklärt.

Für den Einsatz im IPP wurde ein Mehrfach-Lasersystem (5 unabhängige Impulse, $\tau = 500$ psec) auf der Basis des Hochdruck-Stickstofflasers entwickelt, das kurz vor der Auslieferung steht.

Durch Kombination eines Stickstofflasers mit einem als Farbstofflaser ausgebildeten extrem kurzen Resonator gelang die Erzeugung von Einzelimpulsen mit Impulsdauern unter 10 psec.

Im Bereich dichter Plasmen (Plasmafokus) standen neben der Korrelation der zahlreichen experimentellen Parameter mit der Neutronenausbeute vor allem die Skalierungsgesetze bezüglich Speicherenergie und Neutronenausbeute im Vordergrund der Untersuchungen. Die Resultate des 120 kV Fokus-Experimentes zeigten hier bezüglich der bisherigen Energieskalierung eine um den Faktor 3 größere Neutronenausbeute.

Parallel zu diesen Untersuchungen wurden die theoretischen Arbeiten zur Deutung der Prozesse während der dichten Phase des Fokus sowie die Vorbereitungen zur Strahlungsabsorption in der Nähe der Plasmafrequenz weitergeführt.

Zur mittelfristigen Erweiterung der Plasma-Fokus-Untersuchungen auf größere Speicherenergien wurde dem IPF die 500 kJ-Batterie Isar II leihweise zur Verfügung gestellt. Die Vorbereitungen zur Aufstellung dieser Batterie im IPF sind angelaufen.

1. Wellen und Plasmaheizung

(E. Räu Chile, M. A. G. Calderón¹), A. D. Cheetham²),
U. Erz, G. Janzen, F. Moser, P. G. Schüller)

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur Wellenausbreitung befaßten sich vorwiegend mit plasmamagnetischen Wellen (Alfvén-Wellen), da eine Aufheizung von Plasmen mit diesen Wellen aussichtsreich erscheint.

1.1 MHD-Wellen in Hoch-Beta-Plasmen

Im Experiment PLASMAUS 3 wird mit Hilfe einer Θ -Pinch-Entladung ein Ausgangsplasma mit höherem β -Wert erzeugt. In diesem Plasma sollen die Ausbreitung und Dämpfung von magnetoakustischen Wellen untersucht werden. Das Entladungsgefäß ist 3 m lang und hat einen Durchmesser von 30 cm; der Durch-

messer der Kompressionsspule von 2 m Länge beträgt 40 cm. Die Wellen werden durch ein getrenntes Spulensystem innerhalb der Kompressionsspule angelegt und bewirken eine Modulation des Hauptmagnetfeldes.

Die Vorionisierung des Plasmas geschieht mit Hilfe eines Hochfrequenzimpulses ($f = 27$ MHz, $\tau \approx 1$ s), an den sich eine z-Pinch-Entladung anschließt. Bei einer Ladespannung von 100 kV ergibt sich ein Stromimpuls von 80 kA mit einer Pulsdauer von 5 μ s. Diese Vorionisierung wurde in Wasserstoff bei Fülldrücken bis herab zu 2 m Torr erfolgreich erprobt.

Bei der Inbetriebnahme der Hauptbatterie ($E = 54$ kJ; $U = 40$ kV) trat infolge von Beschaffungsschwierigkeiten und einem Kondensatordurchschlag eine unvermeidbare Verzögerung ein. Die Anordnung arbeitet jetzt mit einer Anstiegszeit von 5 μ sec und einer Crowbar-Zeitkonstante von 70 μ sec. Die Bestimmung der Plasmamaparameter mit verschiedenen Diagnostikmethoden ist im Anlaufen. Abb. 1 zeigt eine End-on-Aufnahme des Plasmas.

¹) Gast von der Universität Santander, Spanien.

²) Gast von der Flinders University Adelaide, Australien.

1.2 Ausbreitung von Alfvén-Wellen in inhomogenen Plasmen

Die theoretischen Untersuchungen des Ausbreitungsverhaltens von plasmamagnetischen Wellen in zylindrischen, radial inhomogenen Plasmen wurden fortgeführt, wobei besonders der Einfluß der elektrischen Leitfähigkeit auf die Wellenabsorption in räumlich singulären Resonanzstellen diskutiert wurde. Es zeigte sich dabei, daß die elektrische Leitfähigkeit nur bei niedrigeren Temperaturen berücksichtigt werden muß.

Aus dem MHD-Differentialgleichungssystem, das für den allgemeinsten Fall aufgestellt wurde, lassen sich für Spezialfälle die Dispersionsgleichungen bestimmen und analytische Näherungsformeln für bestimmte Parameterbereiche herleiten. Für Wellen mit den azimutalen Modenzahlen $m = \pm 1$ wurden die Dispersionsgleichungen numerisch ausgewertet und mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Bei der theoretischen Behandlung der Ausbreitung in axial inhomogenen Plasmen erhält man u. a. Reflexion der plasmamagnetischen Wellen an axialen Magnetfeldinhomogenitäten und Kopplung verschiedener radialer Moden. Solche Erscheinungen wurden schon früher in PLASMAUS 1 beobachtet.



Abb. 1: End-on-Aufnahme des Θ -Pinch-Plasmas

1.3 Experimente zur Ausbreitung linearer Alfvén-Wellen

Die Arbeiten an der Apparatur PLASMAUS 1 wurden fortgesetzt mit der Untersuchung nicht-axialsymmetrischer Wellentypen. Durch eine um das Entladungsgefäß gelegte Multipolantenne wurden wahlweise $m = +1$ oder $m = -1$ Wellen lokal angeregt. Mit Hilfe von zwei Pulsgeneratoren wurde das magnetische Feld der Sendeantenne breitbandig im Frequenzbereich von etwa 0,4 bis 0,8 MHz erregt. Der Drehsinn des Feldes konnte dabei durch besondere Breitbandphasenschieber gewählt werden. Gemessen wurde das radiale Profil der magnetischen Wellenfeldkomponenten B_θ , B_r und B_z , sowie die axiale Phasengeschwindigkeit und Dämpfung. Zur Zeit werden numerische Rechnungen durchgeführt, um sie mit den experimentellen Ergebnissen zu vergleichen.

1.4 Nichtlineare Torsions-Alfvénwellen

Die theoretische Beschreibung des schwach nichtlinearen Verhaltens der axialsymmetrischen ($m = 0$) Torsions-Alfvénwelle zeigt, daß die nichtlinearen Terme in den MHD-Gleichungen Störungen zweiter und höherer Ordnung der axialen Feldkomponente hervorrufen. Bisherige Arbeiten zeigten für niedrige Amplituden der Torsions-Welle ($|B_\theta| / B_0 \approx 0,04$), daß das gemessene nichtlineare Verhalten in guter Übereinstimmung mit der Störungstheorie steht. Die Messungen wurden fortgesetzt bis in den stark nichtlinearen Wellenbereich ($|B_\theta| / B_0 \approx 0,2$). Bei diesen großen Amplituden der Torsions-Welle wurde eine weitere axiale Feldkomponente beobachtet. Diese Komponente ist nicht in der Störungstheorie enthalten, vielmehr wird vermutet, daß sie in dem stark nichtlinearen Verhalten begründet ist.

1.5 Plasmaerzeugung durch Mikrowellen

Die Erzeugung von Plasmen durch Absorption von Mikrowellen konnte in weitem Fülldruckbereich (10^{-3} – 10^{-4} Torr) erreicht werden. Dabei wird kurzzeitig die Elektronenzyklotronresonanzabsorption durch lokale Absenkung des Magnetfelds erzeugt. Dieses Verfahren ist zur Vorionisierung von Plasmen geeignet. Die ursprünglich verwendete Apparatur ELIZA wurde aufgegeben. Zur Zeit wird eine flexiblere lineare Anordnung (PLASMAUS 4) aufgebaut, bei der sowohl Mikrowellenabsorption als auch die Einkopplung von HF-Strahlung im Ionenzyklotronfrequenzbereich (Antennenproblem) untersucht werden kann.

1.6 Plasmasimulation

Um eine den physikalischen Vorgängen besser angepaßte numerische Plasmasimulation zu erreichen, wurde ein zweidimensionaler Particle-in-Cell Code entwickelt. Dieser PIC-Code beinhaltet selbstkonsistent elektrische Felder und läßt äußere elektrische und magnetische Felder zu. Er soll zunächst an einfachen Beispielen, wie Drift- und Zweistrominstabilitäten, getestet und später zur Beschreibung nichtlinearer Wellenausbreitungen und anomaler Effekte angewandt werden.

2. Hochspannungs-Belt-Pinch

(H. Zwicker, W. Kunz, G. Müller, M. Thumm, L. P. Warich)

Die Untersuchungen am Hochspannungs-Belt-Pinch im IPP Garching waren bisher infolge der begrenzten Dauer des einschließenden Magnetfeldes auf die Phase der schnellen magnetischen Kompression beschränkt. Es wurde deshalb versucht, mit Hilfe eines im IPP vorhandenen Crowbar-Systems die Untersuchungen auf den magnetischen Einschluß nach der schnellen Kompression auszudehnen.

Die Experimente zur zeitlichen Verlängerung des Magnetfeldes wurden Mitte 1976 von Mitarbeitern des IPF in Zusammenarbeit mit dem IPP begonnen und im Herbst erfolgreich abgeschlossen. Mit den vorhandenen elektrisch getriggerten Funkenstrecken war allerdings ein Kurzschluß im Strommaximum nicht möglich, so daß nur 80% der ohne Crowbar vorhandenen Magnetfeldinduktion wirksam bleiben (Abb. 2a). Die Abfallzeit ($1/e$) des Magnetfeldes beträgt dann 50 μ s.

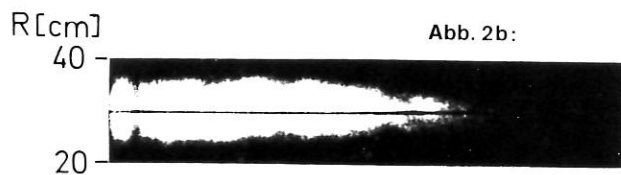
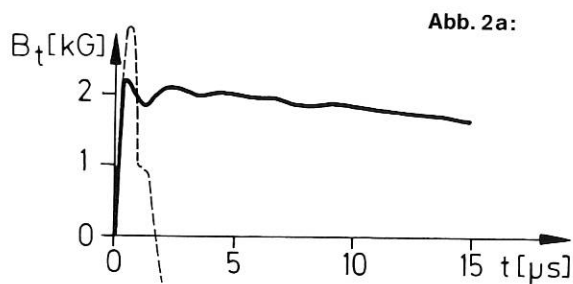


Abb. 2a: Zeitlicher Verlauf des mittleren toroidalen Magnetfeldes am Hochspannungs-Belt-Pinch ohne (gestrichelte Kurve) und mit (durchgezogene Kurve) Crowbar

Abb. 2b: End-on Schmieraufnahme der radialen Bewegung des Plasmas im Hochspannungs-Belt-Pinch

Zunächst waren technische Probleme im Zusammenhang mit der Triggerung der Crowbarfunkenstrecken zu überwinden. Es zeigte sich, daß die Funkenaufbauzeit von der Polarität der Arbeitsspannung (unterschiedliche Polarität der Einspeisung infolge geteilter Feldspule), von der Spannungs-Zeit-Fläche und von der Höhe der Triggerspannung abhängt. Deshalb müssen die Funkenstrecken mit unterschiedlichem Druck betrieben, die Triggerspannung aus einem 3 x 40 kV Marx-Generator entnommen und die Triggerimpulse durch kapazitive Beschaltung der Kabelenden und durch Trennfunkenstrecken aufgeteilt werden (10 kV/ns). Die simultane Zündung aller 12 Crowbarfunkenstrecken wurde durch eine Schmierkamera über Lichtleiter kontrolliert.

Der Einschluß des stoßwellengeheizten Plasmas wurde über die zur Verfügung stehende Crowbarzeit durch Schmieraufnahmen verfolgt. Es zeigte sich, daß das Plasma die zunächst befürchtete radiale Torusdrift nicht durchführt (Abb. 2b). Die beobachtete begrenzte Lebensdauer wird vermutlich durch axiale Drift mitbestimmt. Diese Frage konnte an dem vorhandenen Versuchsaufbau nicht geklärt werden, da hierzu eine Variation der Feldgeometrie am oberen und unteren Ende des Gefäßes nötig wäre. Dies soll nach dem Transfer des Experiments zum IPF in Stuttgart durchgeführt werden.

Die Vorbereitung zur Übernahme begannen Anfang Dezember. Parallel dazu wurden am IPF die räumlichen Voraussetzungen (Bühne in der Experimentierhalle) zur Installation des Experimentes geschaffen. Der zeitliche Ablauf des Umbaus und die Einteilung der anfallenden Montagearbeiten werden mit Hilfe eines Netzprogramms optimiert.

3. Laseranwendungen

(H. F. Döbele, R. Behn, B. Bitzenberger, G. Dodel, K. Gindele, H. Hailer, K. Hirsch, E. Holzhauer, W. Kunz, J. H. Massig, K. Mayerhoffer, R. Reischl, K. Tichmann)

3.1 Streudiagnostik zeitlich veränderlicher Plasma-parameter

Die Arbeiten dieser Abteilung konzentrieren sich vorwiegend auf die Entwicklung diagnostischer Verfahren im Zusammenhang mit künftigen Kernfusionsexperimenten.

Periodisch gepulster YAG-Laser

Die zur zeitlich aufgelösten Streudiagnostik an Plasmen mit Tokamak- oder Stellaratorparametern notwendigen Laserleistungen sind im Jahresbericht 1975 für verschiedene Betriebsweisen des Lasers und verschiedene Detektoren zusammengestellt worden. Die diesen Rechnungen zugrunde liegenden Überlegungen sind inzwischen in einem Streuexperiment mit einem frequenzverdoppelten, akustooptisch periodisch gütegeschalteten Nd-YAG-Laser ($\lambda = 0,532 \mu$) experimentell verifiziert worden.

Der Laser liefert eine mittlere Leistung von 200–400 mW bei einer Wiederholfrequenz von 3 kHz und einer Pulsbreite des frequenzverdoppelten Lichtes von etwa 90 nsec.

Abb. 3 zeigt ein Streuprofil, das mit Hilfe eines Boxcaraveragers am magnetfeldstabilisierten Lichtbogen bei einer Integrationszeit von jeweils 10 Sekunden registriert wurde. Der Vergleich mit den früher durchgeführten Streumessungen mit einem cw-Argonlaser zeigt, daß bei der jetzigen periodisch gepulsten Betriebsweise mit einem Bruchteil der Leistung wie erwartet wesentlich präzisere Streuprofile gemessen werden können.

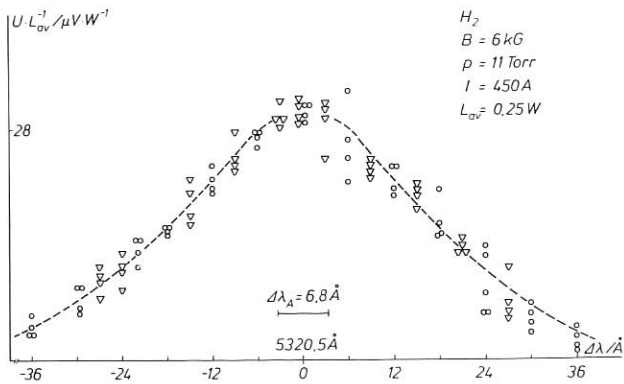


Abb. 3: Streuprofil, frequenzverdoppelter Nd: YAg Laser

Im nächsten Schritt wird die Streuung bei $1,06 \mu$ mit IR-Fotomultiplier und Avalanche Diode durchgeführt – entsprechende Vorbereitungen sind im Gange.

Multipaß-System zur optimalen Lichtausnutzung

Die genannte Technik zur Registrierung von Streuspektren zeitlich veränderlicher Plasmen mit Millisekunden-Zeitauflösung setzt Lasersysteme voraus, die möglichst kurze (einige nsec) Impulse bei mittleren Leistungen um 500 W aufweisen. Derartige Laser sind im Grenzbereich des technisch derzeit Möglichen. Durch mehrfache Ausnutzung des primären Laserlichtes läßt sich die erforderliche Leistung möglicherweise senken. Abb. 4 zeigt eine Anordnung zum Einschluß eines Laserpulses in eine resonatorähnliche Geometrie: Der Laserpuls ($\tau \leq \frac{2L}{c}$) durchsetzt die Polarisatorplatte P. Die zu diesem Zeitpunkt unter ihrer Halbwellenspannung stehende Pockelszelle dreht die Polarisationssebene um 90° . Nach dem Durchtritt durch das Streuvolumen wird der Strahlengang nach Reflexion des Pulses am Spiegel M_1 umgekehrt durchlaufen.

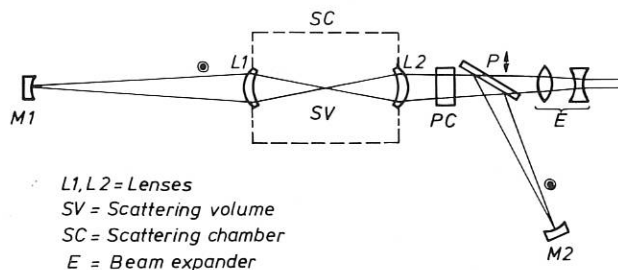


Abb. 4: Multipass-Anordnung zur mehrfachen Laserlicht-Ausnutzung bei Streuexperimenten

Eine von einer lasergetriggerten Funkenstrecke geschaltete Kabelentladung schließt die Pockelszelle kurz, bevor die Pulsflanke auf dem Rückweg bei dieser ankommt, so daß kein Zurückdrehen in die ursprüngliche Polarisationssebene mehr erfolgt. Der Puls ist dann zwischen M_1 und M_2 eingefangen. Der besondere Vorteil dieser „aktiven“ Einschlußmethode gegenüber anderen „passiven“ besteht darin, daß stets dasselbe Streuvolumen durchsetzt wird. Abb. 5 zeigt den Intensitätsverlauf im Quasi-Resonator – gemessen über Rayleigh-Streuung – als Funktion der Zeit. Zur Erprobung wurde ein 20 nsec Rubinlaser verwendet. Von einem solchen System kann eine Verbesserung im Signal-Rauschverhältnis um einen Faktor 4 erwartet werden.

Spikender Rubinlaser

Die Vorteile des periodisch gepulsten Betriebs bei der zeitaufgelösten Streudiagnostik, wie sie für den Fall des Nd-YAG-Lasers bereits nachgewiesen wurden, gelten auch für einen Rubinlaser im „spiking-mode“. Dabei bewegt sich jedoch die Gesamt-Meßzeit im Millisekundenbereich, so daß sich das Verfahren zur

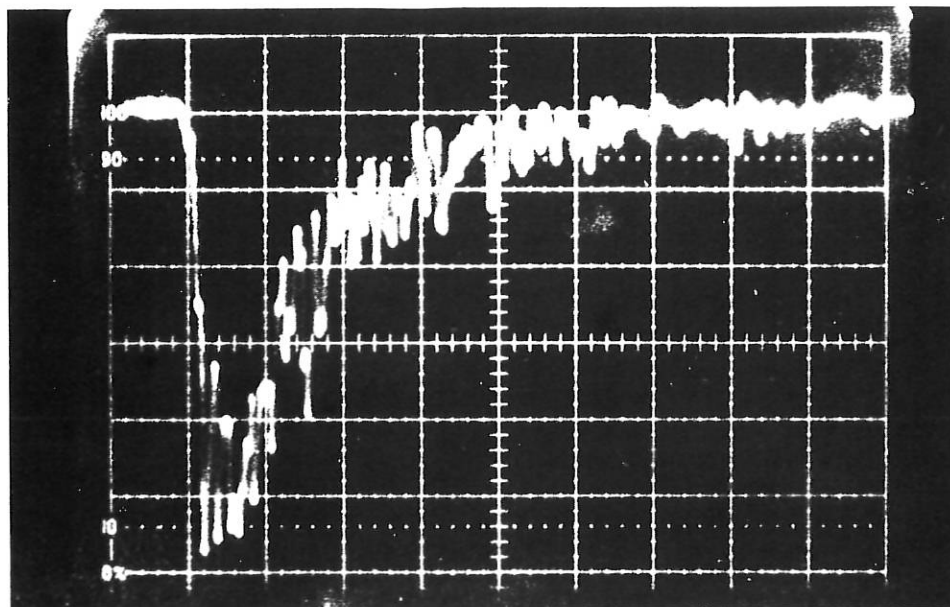


Abb. 5:
 Laserintensität
 im Multipass-System
 (Impulsbreite $\approx 20 \text{ nsec}$;
 100 nsec/div)

Untersuchung von Änderungen der Plasmaparameter im Submillisekundenbereich eignet. Der Aufbau eines solchen Systems ist nahezu abgeschlossen. Es wurde eine mittlere Leistung von 20 kW angestrebt. Der Laser soll ein Impulsfolge aus etwa 100 „spikes“ emittieren. Als Energiespeicher dient eine 30 kJ Kondensatorbatterie, die als Laufzeitkette für einen Anregungsimpuls mit einer Plateauzeit von ca. 1 ms ausgelegt ist. Zur Erzeugung periodischer Impulse wird die Resonatorgüte in Resonanz mit der spiking-Eigenfrequenz moduliert. Außer der Steuerung der Modulation über einen externen Impulsgenerator besteht die Möglichkeit, durch eine Rückkopplungsschaltung eine Verstärkung und Frequenzstabilisierung der Relaxationsimpulse zu erreichen. Der Modulator kann gegebenenfalls zum periodischen Q-switch ausgebaut werden.

Nach Erprobung des Lasersystems ist ein erster Einsatz an PLASMAUS III vorgesehen.

3.2 Stationäre Streuung bei 10,6 μ

Integrale Streulichtmessungen am magnetfeldstabilisierten Bogen mit einem Hg-dotierten Ge-Detektor hatten – wie im Jahresbericht 1975 dargelegt – Werte ergeben, die auf thermische Fluktuationen hinwiesen.

Mit einer Laserleistung von 160 Watt cw und Rotationslinienauswahl ist es jetzt gelungen, das Spektrum ($\alpha \approx 6$, $\Theta = 90^\circ$) aufzulösen. Dies war durch verbesserte Falschlichtunterdrückung und rauschärmere Nachverstärkung des Detektorsignals möglich geworden. Die Spektralzerlegung wurde zunächst mit einem piezoelektrisch durchgestimmten und mit einem He-Ne-Laser-Interferometer stabilisierten Fabry-Perot-Interferometer durchgeführt. Deutlich stabilerer Betrieb war jedoch durch Verwendung eines thermostatisierten Druckgefäßes und Druckabastung mit Luft möglich. Die Platten (Ge) waren mit einer 80% reflektierenden Beschichtung versehen; eine Finesse von 5 wurde gemessen. Der auflösbare Spektralbereich betrug $\Delta\lambda_A = 11 \text{ \AA}$, der Druckbereich umfaßte 2,7 bar.

Abb. 6 zeigt eines der registrierten Profile der Ionenlinie. Es ist dies wohl die erste spektral aufgelöste Messung eines solchen Ionenstreuungsspektrums mit einem CO₂-Laser. Die Halbwertsbreite von $\approx 25 \text{ \AA}$

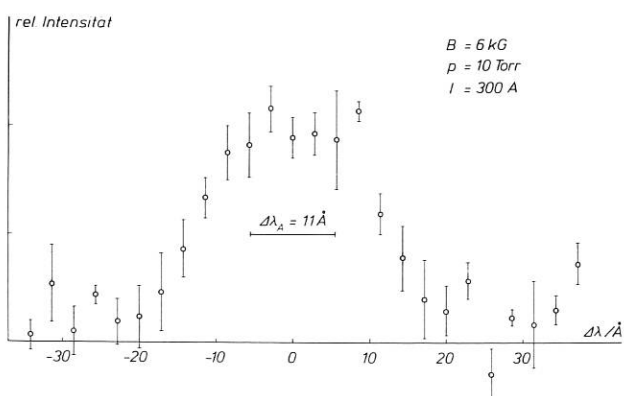


Abb. 6: Stationäre Streuung bei 10,6 μ : Ionenlinie reg. am magnetfeldstabilisierten Bogen

entspricht $T_i \approx 1,5 \text{ eV}$ was gut zu dem früher mit dem Ar⁺-Laser gemessenen Wert für T_e bei gleicher Betriebsbedingungen der Bogenanlage paßt.

3.3 Gepulste Streudiagnostik bei 10,6 μ mit Überlagerungsempfang

Erste Ergebnisse, gemessen am magnetfeldstabilisierten Bogen, liegen vor. Leistung und Bandbreite des Streusignals entsprechen den für ein thermisches Plasma erwarteten Werten. Die Messungen werden vor allem durch Weiterentwicklung des Justier-Verfahrens ermöglicht. Mit einem Ultraschall-Wellengitter in Luft am Ort des Streuvolumens läßt sich ein dopplerverschobenes Streusignal der im späteren Experiment sichtbar gemachten Fluktuationswellenlänge erzeugen. Mit dieser Methode war es möglich, das effektive Streuvolumen, die Winkelcharakteristik und die Misch-effizienz des Überlagerungsempfängers zu bestimmen.

Parallel hierzu wurden Rechnungen durchgeführt, in denen insbesondere der Einfluß der endlichen Abmessungen des Streuvolumens auf die Verschmierung des Streuspektrums bei der Streuung an thermischen Dichtefluktuationen und Wellenerscheinungen untersucht wird.

Gegenwärtig werden spektral besser aufgelöste Streumessungen vorbereitet.

3.4 Stationäre Streuung bei 10,6 μ mit optischem Überlagerungsempfang

In Vorbereitung des Streuexperiments wurden der Laser verbessert, ein neuer Ge-Cu-Detektor erprobt und mit dem Aufbau der elektronischen Signalnachverarbeitung begonnen. Bei dem stationären CO₂-Laser konnte der für diese Anwendung erforderliche single-mode-Betrieb mit einer besonderen Längsstabilisation unter Umgehung der sonst üblichen Modenblende erreicht werden. Dabei wurde sowohl eine Leistungserhöhung als auch eine Verringerung der Strahldivergenz erzielt.

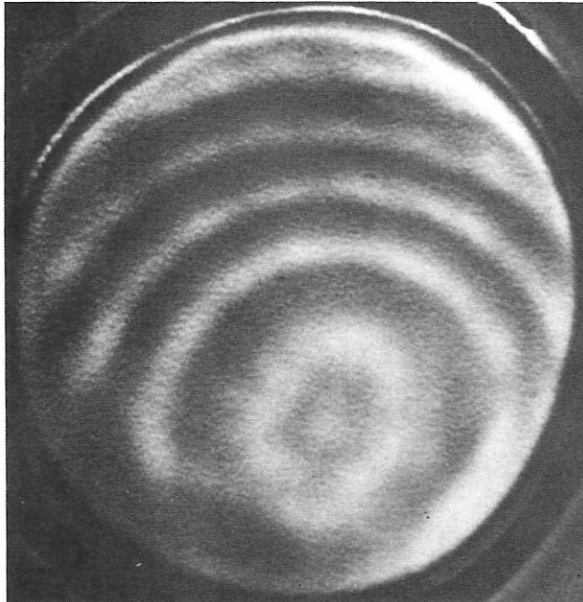
Der Infrarot-Detektor wurde hinsichtlich seiner für den optischen Überlagerungsempfang wichtigen Eigenschaften in der Weise erprobt, daß die Strahlung eines geeichten Schwarzstrahlers mit einem abgeschwächten Laserstrahl gemischt wurde. Die Quanteneffizienz wurde so zu ca. 40% bestimmt. Neben diesem befriedigenden Wert weist der Detektor allerdings unterhalb von 50 MHz 1/f-Rauschen auf, welches die Nachweisgrenze bei niedrigen Frequenzen sehr beeinträchtigt. Mit dem Aufbau des Streuexperiments wird Anfang 1977 begonnen.

3.5 Diagnostik im Fernen IR

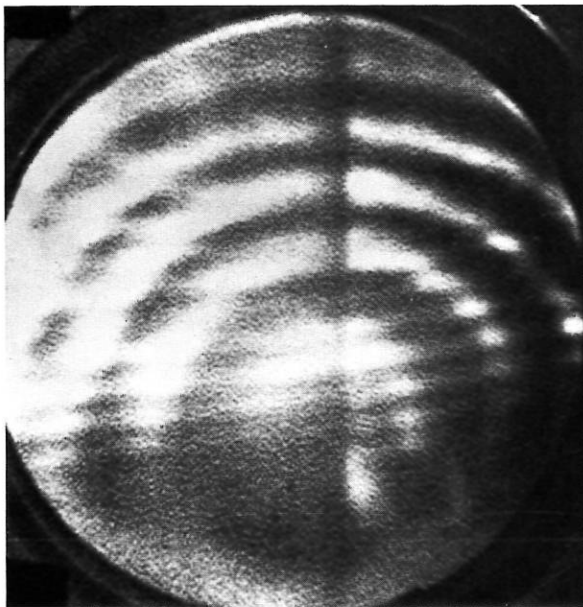
Interferometrie

Die pyroelektrische Kamera (Fa. Heimann) als 2-dimensionaler FIR Detektor wurde mit Hilfe eines CO₂-Lasergepumpten D₂O SuperstrahlungsLasers erprobt. Dieser Laser emittiert bei $\lambda = 66 \mu$, 94μ und 385μ und ist daher hierzu besonders geeignet. Bei Pumpenergien um 10 J lassen sich zwischen 2 mJ und 20 mJ FIR-Strahlung erreichen.

Abb. 7 zeigt ein bei $\lambda = 66 \mu$ hinter einem Fresnelschen Biprisma erzeugtes Interferogramm. Ohne Entspiegelung für eine spezielle Arbeitswellenlänge treten störende Interferenzen – vermutlich zwischen pyroelektrischem Target und Germaniumfenster – auf. Die Ansprechempfindlichkeit der Röhre im FIR liegt mit etwa 10^{-5} J/cm^2 unterhalb des früher für 10μ gemessenen Wertes ($6 \cdot 10^{-7} \text{ J/cm}^2$). Der Grund hierfür dürfte sowohl in der schlechteren Transmission des Ge-Fensters als auch in einer geringeren Absorption des pyroelektrischen Targets im FIR zu suchen sein.



(a)



(b)

Abb. 7: Pyroelektrisch registriertes FIR-Interferogramm (b) und störende Interferenzen Fenster/Target (a)

Polarimetrie

Zur Messung von Magnetfeldstärken an Plasmen mit Tokamak-Daten über die Drehung der Polarisations Ebene elektromagnetischer Strahlung ist der Wellenlängenbereich zwischen 300μ und 600μ besonders geeignet. Hier ist einerseits der erwünschte Effekt von ausreichender Größe, während der störende Cotton-Mouton-Effekt sich noch in vernünftigen Grenzen hält. Abb. 8 zeigt die Verhältnisse für Plasmadaten, wie sie z. B. für ASDEX erwartet werden ($n_{e0} = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; $B_{p \text{ max}} = 2,9 \text{ kG}$; $B_T = 30 \text{ kG}$; $a = 40 \text{ cm}$).

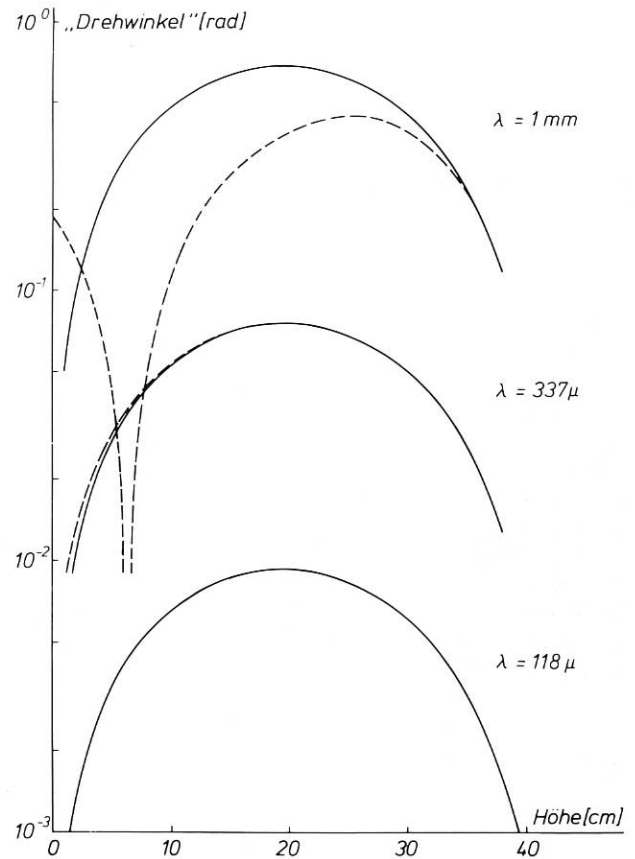


Abb. 8: Polarisationsänderungen hervorgerufen durch Faradayeffekt (Poloidalfeld) — und überlagerten Cotton-Mouton-Effekt (Toroidalfeld) ---- für verschiedene Laserwellenlängen, berechnet für die erwarteten ASDEX-Daten

Die notwendige Meßgenauigkeit mit Millisekunden-Zeitauflösung erscheint mit Hilfe eines Modulationsverfahrens möglich, wobei die Polarisations Ebene des eingestrahnten Laserlichts um kleine Winkel oszilliert.

Mit Hilfe eines Ferritplättchens als Polarisationsdreher, einer HCN-Laser-Leistung von etwa 5 mW , einem Putley-Detektor (NEP gemessen: $5 \cdot 10^{-9} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$) wurde bei einem Modulationshub von 3° bei einer Frequenz von 7 kHz und einer Meßzeit von 100 msec ein Drehwinkel von 3 mrad mit einem Signal-Rauschverhältnis von 10 gemessen. Durch künftige Messungen

mit einem 100 mW-Laser und einem neuen (vermutlich um mindestens 1 Zehnerpotenz besseren) Putley-Kristall sollen die Grenzen der auflösbaren Drehwinkel ermittelt werden.

4. Kurzzeittechnik

(H. H. Maier, H. Salzmann und H. Strohwald)

Die Untersuchungen in diesem Bereich beziehen sich auf Entwicklungen, die z. B. für die Kurzzeitdiagnostik an lasererzeugten Plasmen und am Plasmafokus erforderlich sind. Darüberhinaus wurden Überlegungen zur Laserdiagnostik von neutralem Wasserstoff und Verunreinigungen in Tokamak-Plasmen angestellt.

4.1 Hochdruck-Stickstofflaser für ultrakurze Laserimpulse

Der Stickstofflaser mit Wanderwellenanregung konnte mit Impulsaufladung bis zu einem Fülldruck von 15 bar (Stickstoff ohne Zusatzgas) betrieben werden. Entgegen den Erwartungen brachte die Erhöhung des Fülldrucks von 6 auf 15 bar keine nennenswerte Impulsverkürzung. Gemessen wurde eine Impulsdauer von 40 psec bei 15 bar gegenüber 50 psec bei 6 bar. Bei einer Kanallänge von 50 cm bedeutet die beobachtete Impulsdauer von ≈ 50 psec eine Synchronisation der Laufgeschwindigkeit der Inversionszone mit der Lichtgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von etwa 3%. Bei den Experimenten wurde die Laufgeschwindigkeit über einen linear anwachsenden Elektrodenabstand eingestellt. Für die erwarteten Impulsdauern von 10 psec hätte die Abweichung der beiden Geschwindigkeiten unter 1% liegen müssen, was sich mit dieser einfachen Maßnahme offenbar nicht erreichen ließ.

Zum Einsatz bei der Pelletgruppe im IPP Garching wird z.Zt. ein Mehrfach-Lasersystem mit 5 unabhängig triggerbaren Ausgangsimpulsen (Impulsdauer jeweils 0,5 nsec) fertiggestellt. Es soll als Lichtquelle für Schattenaufnahmen und Interferometrie benutzt werden.

4.2 Erzeugung ultrakurzer Farbstofflaser-Einzelimpulse

Mit Stickstofflasern von 100 psec Dauer wurde ein Farbstofflaser in einem extrem kurzen Resonator (Resonatorlänge $40 \mu\text{m}$) hoher Verluste (Resonatorverweilzeit 0,05 psec) gepumpt (siehe Abb. 9). Es wurden Relaxationsschwingungen mit Impulsdauern < 10 psec beobachtet. Bei Einstellung der Pumpleistung knapp über dem Schwellwert emittierte der Farbstofflaser Einzelimpulse (Impulsdauer < 10 psec) (Abb. 10).

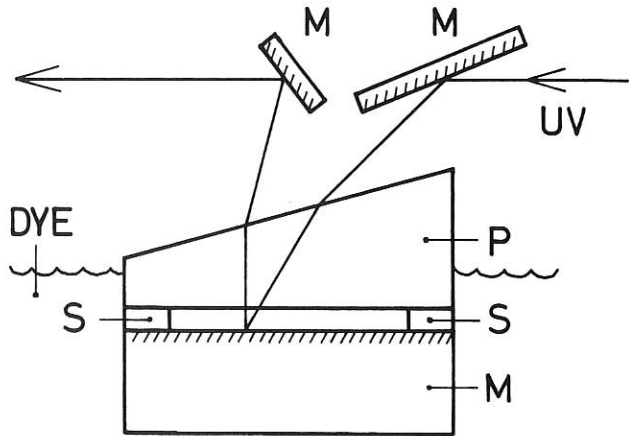
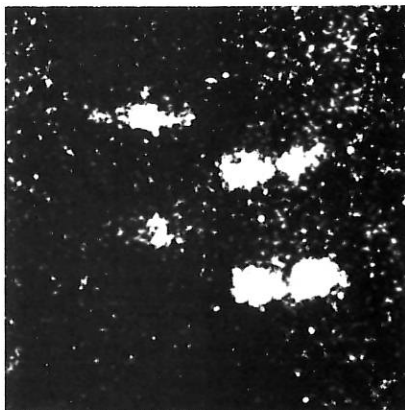
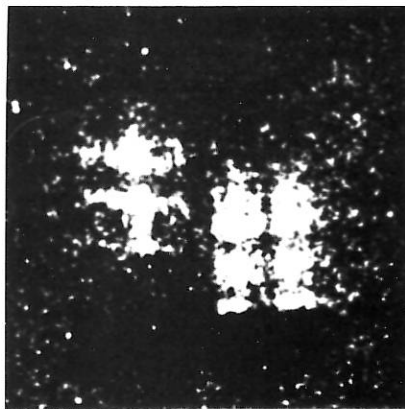


Abb. 9: Farbstofflaser - Aufbau
M - hoch reflektierende Spiegel
S - Abstandhalter
P - Prisma



Ablenkrichtung

36 ps

Abb. 10: Schmierkamera-Aufnahmen der Farbstofflaseremission.

Von a nach c abnehmende Pumpleistung

4.3 Zwei-Photonenstreuung an neutralen Wasserstoffatomen mit Hilfe eines VUV-Lasers und eines Lasers im Sichtbaren

Es wurde die Möglichkeit diskutiert, mit Hilfe des Zwei-Photonen-Effektes neutrale Wasserstoffatome vom Grundniveau in den zweiten angeregten Zustand zu pumpen, so daß der optische Nachweis über Emission von H_{α} erfolgen kann. Zur Erhöhung des Wirkungsgrades soll einer der beiden Laser nahe bei Ly_{α} emittieren. In Frage kommen hierbei vor allem der H_2 Molekül-Laser im Werner-Band und der Argon-Excimer-Laser. Erste Abschätzungen mit Hilfe der Störungsrechnungen ergaben, daß dieses Verfahren unter Berücksichtigung des Standes der Technik von VUV-Lasern mit dem Nachweisverfahren über Anregung ins erste angeregte Niveau konkurrenzfähig sein sollte.

5. Plasmafokus

(G. Decker, Y.H. Chen*, J. Ehrhardt, A. Imam, H.J. Kaepeler, B. Nahrath, T. Oppenländer, G. Proß, B. Rückle, P. Schilling, H. Schmidt, M. Shakhatre, M. Trunk)

- 1) Detailuntersuchungen zur Plasmadynamik in der Pinchphase mittels simultan angewandter Diagnostik, Suche nach Korrelationen zwischen den verschiedenen Meßgrößen und der Neutronenausbeute.

- 2) Maximierung des Pinchstroms durch MHD-Skalierungsrechnungen.
- 3) Kritische Überprüfung der bekannten Skalierung der Neutronenausbeute Y mit der Speicherenergie W ($Y \propto W^2$) mittels eines neu aufgebauten Hochspannungsfokus.
- 4) Analytische Beschreibung der Neutronenemission und modellmäßige Erfassung von Phänomenen in der dichten Phase.
- 5) Vorbereitung eines Wechselwirkungsexperiments bei der Plasmafrequenz des Fokusplasmas mittels eines Fluorwasserstofflasers.

Resultate:

- 1) Es wurde eine Chronologie der Pinchkompression aus Interferogrammen (mittels N_2 -Laser, $\tau=0,5\text{ nsec}$) und Kanalplattenaufnahmen im weichen Röntgengebiet ($\tau=3\text{ nsec}$) aufgestellt. Abb. 11 zeigt als Beispiel aus dem Zeitablauf eine Simultanaufnahme des Pinches von der Seite her, bestehend aus einem Interferogramm und zwei Lochkamera-Aufnahmen (durch zwei verschieden dicke Be-Folien hindurch). Hieraus können dichte und heiße Zonen und ihre

* Gastforscher, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia

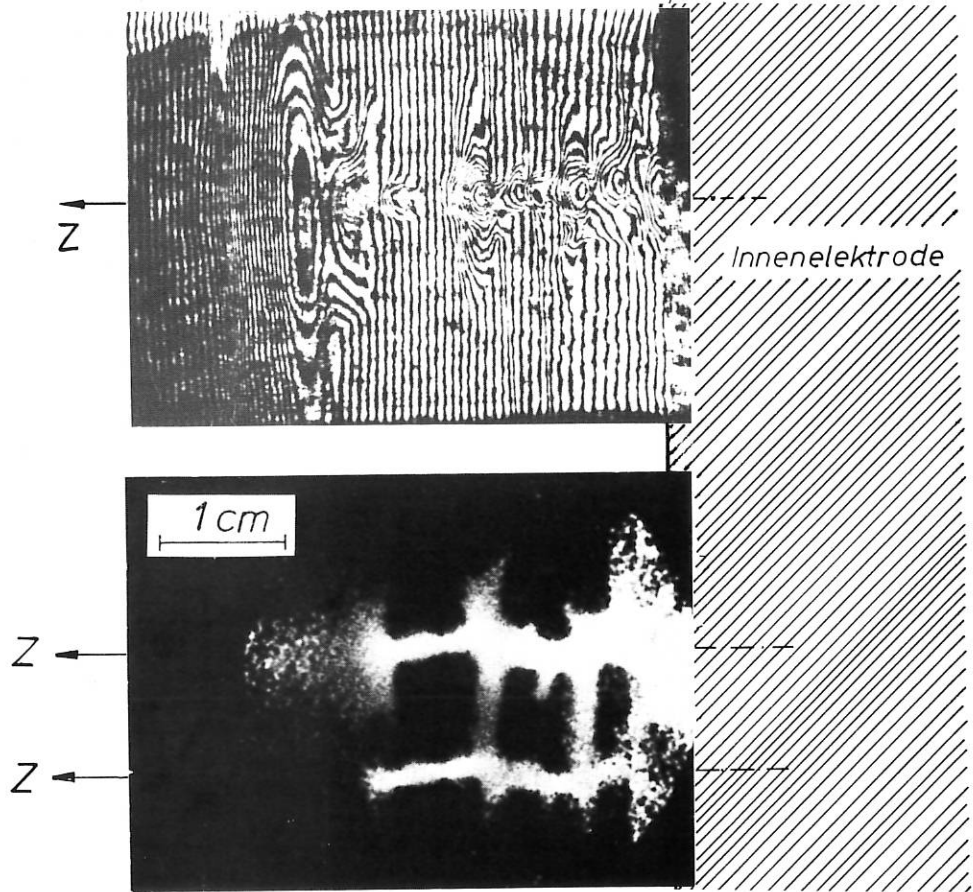


Abb. 11:
Simultane Diagnostik des Plasmafokus
 oben: Interferogramm ($\tau = 0,5\text{ ns}$)
 unten: 2 Röntgenaufnahmen (oben $10\ \mu$, unten $50\ \mu\text{ Be}$)
 mittels Kanalplatte ($\tau = 3\text{ ns}$)

Entwicklung identifiziert werden. Abb. 12 zeigt ein Magnetsondensignal ($\sim \dot{B}$), aufgenommen in der Nähe des Pinches. Es läßt sich in zwei Teile gliedern (a, b). Teil a entsteht durch die über die Sonde laufende Schicht und liefert Informationen über Schichtstrom, Stromdichteverteilung und Magnetfeldanstiegszeit. Teil b wird durch Instabilitäten ($m=0$) der Plasmasäule erzeugt.

Aus diesen Messungen können eine Reihe von notwendigen aber nicht hinreichenden Bedingungen für das Zustandekommen eines „guten Fokus“ – charakterisiert durch die hohe Neutronenausbeute – abgeleitet werden. Weiter wird eine Korrelation zwischen der mittleren Neutronenausbeute Y und dem mittleren Pinchstrom I mit

$$Y \propto I^{4.1}$$

mit den Korrelationskoeffizienten

$$r^2 = 0.93$$

festgestellt.

Eine Korrelation – die erste bisher aufgefundene – für jede Einzelentladung besteht zwischen der Neutronenausbeute und der Amplitude der Instabilitätsoszillationen („Teil b“) des Sondensignals.

2) Die MHD-Rechnungen zeigen klar die Möglichkeit auf, durch extrem niederinduktive Batterien bei hohen Spannungen (≈ 100 kV Bereich) weitaus höhere Pinchströme und damit höhere Neutronenausbeuten zu erreichen, als es bisher aus Kondensatorbatterien gleichen Energieinhalts mit relativ niedrigeren Spannungen möglich war.

3) Das daraus resultierende „Durchbrechen“ der Neutronenskalierung $Y \propto W^2$ (W = Batterieenergie) wurde am Hochspannungsfokus (85–120 kV, $L_0 = 35$ nH, $W = 12$ –24 kJ) demonstriert.

Von den Niederspannungsexperimenten unterscheidet sich dieser Fokus vor allem durch einen großen $I(0)$ -Wert und eine kleine Stromanstiegszeit (typisch $\tau/4 = 500$ ns).

In der ersten Experimentierphase wurden Arbeitsbereiche für Neutronenproduktion bei 12 kJ Speicherenergie (85 kV) aufgesucht. Im Gegensatz zu unserem langsameren 20 kV-Experiment MINIFOKUS reichten für die Optimierung der Neutronenausbeute Variationen des Fülldrucks und der Länge der Innenelektrode nicht aus. Es war darüber hinaus gleichrangig eine Variation des Innenelektrodenradius erforderlich. Dies ist eine Konsequenz des schnellen Stromanstiegs; die Zeit für die Radialkompression bildet einen nicht mehr zu vernachlässigenden Teil der gesamten Entladungszeit.

Mit der sukzessiven Verkleinerung des Radius (33 mm \rightarrow 25 mm \rightarrow 12,5 mm) steigerte sich die Neutronenausbeute drastisch; der Druckbereich für Neutronenproduktion verbreiterte sich und verlagerte sich gleichzeitig zu deutlich höheren Druckwerten. Neutronenproduktion konnte noch bei 60 Torr (!) beobachtet werden, während bei Maschinen gleicher Energie im Niederspannungsbereich Drücke im 1 Torr-Bereich typisch sind.

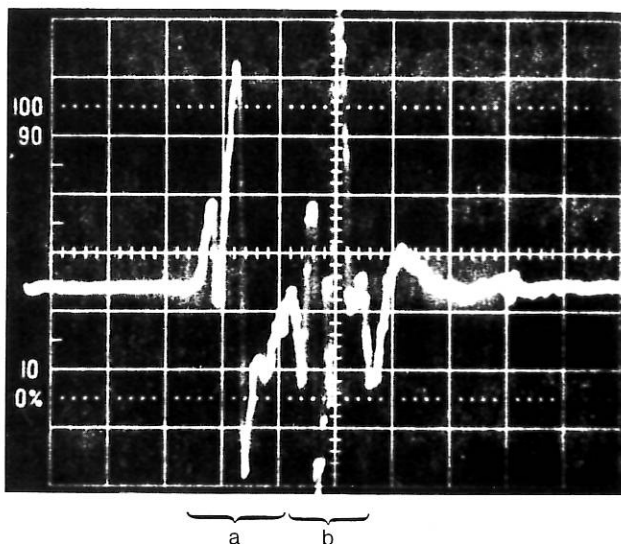


Abb. 12: \dot{B} -Signal beim Plasmafokus (12 kJ, 20 kV)
Sonde in $r = 25$ mm, $z = 10$ mm
Position relativ zur Entladungssache
($r = 0$) und Mittelelektrodenende ($z = 0$)

Verglichen mit MINIFOKUS (20 kV, 12 kJ, 70 nH), der mit seinen $1 \cdot 10^9$ Neutronen auf der experimentell gefundenen Skalierungskurve $Y \sim W^2$ liegt, ist die Ausbeute des Hochspannungsfokus im Augenblick dreimal größer. Bezüglich der Stromskalierung der Ausbeute kann eine Übereinstimmung mit $Y \sim I^{3.3}$ festgestellt werden.

Die Bedeutung dieses Experiments für den geplanten Betrieb eines 500 kJ Fokus wird noch zu analysieren sein.

4) Die Arbeiten zur Entwicklung eines analytischen Modells für den Plasmafokus werden zum Abschluß gebracht und zur Veröffentlichung eingereicht. In der Neutronenskalierung in Abhängigkeit vom Strom ergab sich das bekannte I^4 -Gesetz für den Anteil der Neutronen thermischen Ursprungs, während für Neutronen aus Beschleunigungsprozessen das I^4 -Gesetz nur bei Strömen von 10^6 Ampere gilt. Bei höheren Werten des Stromes nimmt der Exponent ab, so daß für Ströme von größer $5 \cdot 10^6$ Ampere der thermische Mechanismus zur Neutronenerzeugung überwiegt. Voraussetzung für thermische Produktion ist allerdings, daß der Fülldruck größer ist als ein gewisser kritischer Wert, für dessen Berechnung eine Formel abgeleitet wurde.

5) Zur Vorbereitung der Laser-Fokusplasma-Wechselwirkungsexperimente bei der Plasmafrequenz wurden Versuche zur Einzellinienverstärkung von Impulsen um 10 ns Halbwertsbreite durchgeführt. Ferner wurde für den Marxgenerator des vorgesehenen HF-Laser-Verstärkers eine Mehrkanalfunkenstrecke entwickelt. Die Versuchsversion hat 14 nH bei 50 kV statischer Durchschlagsspannung. Damit sollten die erwünschten steilen Stromanstiege zu realisieren sein.

Die Experimente werden durch die DFG finanziell unterstützt.

Veröffentlichungen des Instituts für Plasmaforschung der Universität Stuttgart

- R. Behn, H.F. Döbele*
Fabry-Perot Recycling Spectrometer
Appl. Optics 15 1850 (1976)
- G. Decker and R. Wienecke*
Plasma Focus Devices
Physica 82C (1976) 155-164
- G. Dodel, J. Krautter, H. Högelsperger*
Application of Evaporography to Imaging of FAR-Infrared Radiation Patterns
Infrared Physics 16, 237 (1976)
- H. F. Döbele, K. Hirsch*
Evidence for Laser-Induced Effects in Laser Scattering Diagnostics
Physics Letters 56A, 282 (1976)
- H. F. Döbele, K. Hirsch*
Anomalies in Scattered Spectra of a Hydrogen Arc Plasma Irradiated by a Continuous Argon Ionlaser
Phys. Letters 56A, 282 (1976)
- H. F. Döbele, J. H. Massig*
Application of a Fabry-Perot Spectrometer to the Measurement of Spectral Line Shift much smaller than Line width
Applied Optics 15, 69 (1976)
- E. Holzhauer*
Infrared Plasma Diagnostics with Lasers
Infrared Physics 16, 135 (1976)
- W. Kunz, G. Dodel*
A Far Infrared Schlieren Experiment Performed on a Carbon Arc
Phys. Letters 57A, 137 (1976)
- B. Nahrath, W. E. Blanz and G. Decker*
Exposure Time of a Pulsed Channelplate
Rev. Sci. Instr. Vol. 48, No. 1, p. 95, Jan. 1977
- H. Strohwald und H. Salzmann*
Picosecond uv Laser Pulses from Gas Discharges in Pure Nitrogen at Pressures up to 6 atm
Appl. Phys. Lett. 28, 272 (1976)
- H. Salzmann und H. Strohwald*
Single Picosecond Dye Laser Pulses by Resonator Transients
Phys. Letters 57A, 41 (1976)
- G. Janzen*
Geometry Factors for TE_{0mn} Resonance Cavities for Diagnostics of Large Diameter Plasmas
Austr. Journ. of Physics 29 (1976), Heft 5

APS-Tagung

- F. Söldner, K. H. Steuer, IPP Garching*
G. Müller, M. Thumm, L. Warich, H. Zwicker, IPF Stuttgart
Fast Shock Heating and Plasma Confinement in the High Voltage Belt-Pinch
Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, 21 (1976) 1093

Konferenzberichte

Vorträge auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Hannover 1976

H. Hailer
Laserstreuung am magnetfeldstabilisierten Wasserstoffbogen mit einem stationären CO₂-Laser
Vortrag P-32

G. Dodel, W. Kunz
Evaporographische und pyroelektrische Bildaufzeichnung zur zweidimensionalen Plasmainterferometrie im FIR
Vortrag P-48

E. Räuchle
Aufheizung von Plasmen durch Wellen (Fachbericht)
Vortrag P-8

E. Berger, G. Müller, e. Räuchle
Anomale Dämpfung bei Torsions-Alfvénwellen großer Amplitude
Vortrag P-9

H. Salzmann
Ultrakurze, ultraviolette Laserimpulse
Hauptvortrag H-8

B. Nahrath
Kurzzeit-Röntgenbilder mit Hilfe einer gepulsten Kanalplatte
Vortrag K-14

B. Rückle, H. Schmidt
Dichte und Neutronenausbeute des Plasmafokus Nessi
Vortrag P-20

H. Schmidt
Der Einfluß des Dichteprofiles auf die Neutronenausbeute des Plasmafokus
Vortrag P-21

T. Oppenländer, G. Proß
Strommessung am Plasmafokus mit schnellen Magnetsonden
Vortrag P-22

G. Decker, G. Proß, H. Schmidt, M. Shakhatre, M. Trunk
Experimente an einem 120 kV Plasmafokus
Vortrag P-23

F. Mast, P. Schilling
300 ps Hochspannungsteiler in Koaxial- und Bandleitergeometrien
Vortrag K-39

6th Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion Research, Berchtesgaden 1976

H. J. Kaeppler
Neutron Production in the Dense Plasma Focus
CN-35/E 18-1

G. Decker, B. Nahrath, T. Oppenländer, G. Proß, B. Rückle, H. Schmidt, M. Shakhatre, M. Trunk
Dynamics of 120 and 20 kV Plasma Focus Devices with Respect to Density and Current Distribution, Neutron and X-ray Emission
CN-35/E 18-1

3. Allunionskonferenz über Plasmabeschleuniger, Minsk 1976

G. Decker
Plasma Focus Research at Stuttgart

Submillimeter Wave Conference, Puerto Rico 1976

G. Dodel, W. Kunz
Evaporographic and Pyroelectric Image Recording for two-dimensional Plasma Interferometry in the Far Infrared

DFG-Kolloquium

Physik der elektrischen Entladungen in der Hochspannungstechnik
(Stuttgart Oktober 1976)

G. Decker
Hochspannungs-Plasmafokus
Fusionsorientierte Plasmaphysik
(Garching Juni 1976)
G. Decker
Plasmafokusexperimente am IPF

Dissertationen

E. Berger
Untersuchungen der Ausbreitung von Torisons-Alfvénwellen großer Amplituden
Dissertation Universität Stuttgart 1976,
(Bericht IPF 76-2)

K. Tichmann
Eine Modellplasmaquelle für Untersuchungen im Elektronendichtebereich 10^{11} – 10^{13} cm⁻³
Dissertation Universität Stuttgart 1976,
(Bericht IPF 76-4)

Diplomarbeiten

J. Ehrhardt
Versuche zur Faradayrotation am Plasmafokus
A. Sieber
Aufbau eines niederinduktiven, lasergetriggerten Hochspannungsimpulsgenerators

T. Oppenländer
Messung der axialen Stromdichteverteilung am Plasmafokus (Bericht IPF 76-3)

K. Gindele
Untersuchungen der Eignung von Multipass-Anordnungen zum Einsatz bei Streumessungen an Plasmen mit periodisch gepulsten Lasern

B. Rückle
Elektronendichtemessungen am Plasmafokus (Bericht IPF-76-1)

Semesterarbeiten

W.E. Blanz
Messung der Belichtungszeit einer Planardiode mittels N₂-Laser

M. Wolf
Erzeugung kurzer Hochspannungsimpulse zur Ansteuerung einer Kanalplatte

J. Goldschmidt
Aufbau eines Hochspannungsimpulsgenerators zur Funkenstreckentriggerung

W. Kies
Lebensdauertest an Elektrolytkondensatoren im Kurzschlußbetrieb

K. Tran Tuan
Verstärkermessungen an einem Fluorwasserstofflaser

Laborbericht

J. M. Perez Díaz, M. A. Garcia Calderón
Estudio Experimental de la Absorción de Ondas Electromagnéticas por un Plasma Magnetoactivo con una Unión Turnstile
Bericht Universität Santander (Spanien) 1976

Institut für Festkörperphysik, Lehrstuhl E20, der Technischen Universität München

(Prof. Dr. Dietrich Menzel)

Die Messungen der Photodesorption durch weiche Röntgenstrahlung wurden fortgesetzt. Ionendesorption wurde an W (110) unter verschiedenen Belegungsbedingungen untersucht. Erste Messungen von desorbierenden Neutralteilchen waren erfolgreich. Durch Messung der Photonenintensität konnten die absoluten Desorptionswahrscheinlichkeiten bestimmt werden.

Photodesorption von Metalloberflächen bei hohen Photonen-Energien

(R. Franchy, D. Menzel)

Das im letzten Jahresbericht beschriebene Projekt der Messung von Photodesorption durch weiche Röntgenstrahlung wurde fortgesetzt. Die bisher an Edelstahl- und polykristallinen Wolframproben durchgeführten Untersuchungen wurden zur Verbesserung der Oberflächendefinition mit W (110)-Einkristallflächen wiederholt. Auch hier ergaben sich Ionendesorption von H^+ und O^+ , deren Intensität sehr stark von der Vorgeschichte, d. h. den exakten Asorptionsschichten auf

der Oberfläche abhing. Außerdem wurde die Apparatur so umgebaut, daß Messungen von desorbierenden Neutralteilchen möglich werden. Erste orientierende Messungen ergaben meßbare Signale; die Empfindlichkeit des Nachweises muß jedoch noch erhöht werden.

Da die Desorptionssignale bisher nur in relativen Einheiten gemessen wurden, absolute Querschnitte aber von großem Interesse sind, wurden Energieverteilung und Intensität der verwendeten weichen Röntgenstrahlung gemessen. Bei ~ 1500 eV liegen die Desorptionswahrscheinlichkeiten zwischen 10^{-4} und unter 10^{-6} Ion/Photon.

JAHRESBERICHT 1976

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik · Garching bei München

Redaktion und Gestaltung: Helmuth F. Wüst, Garching

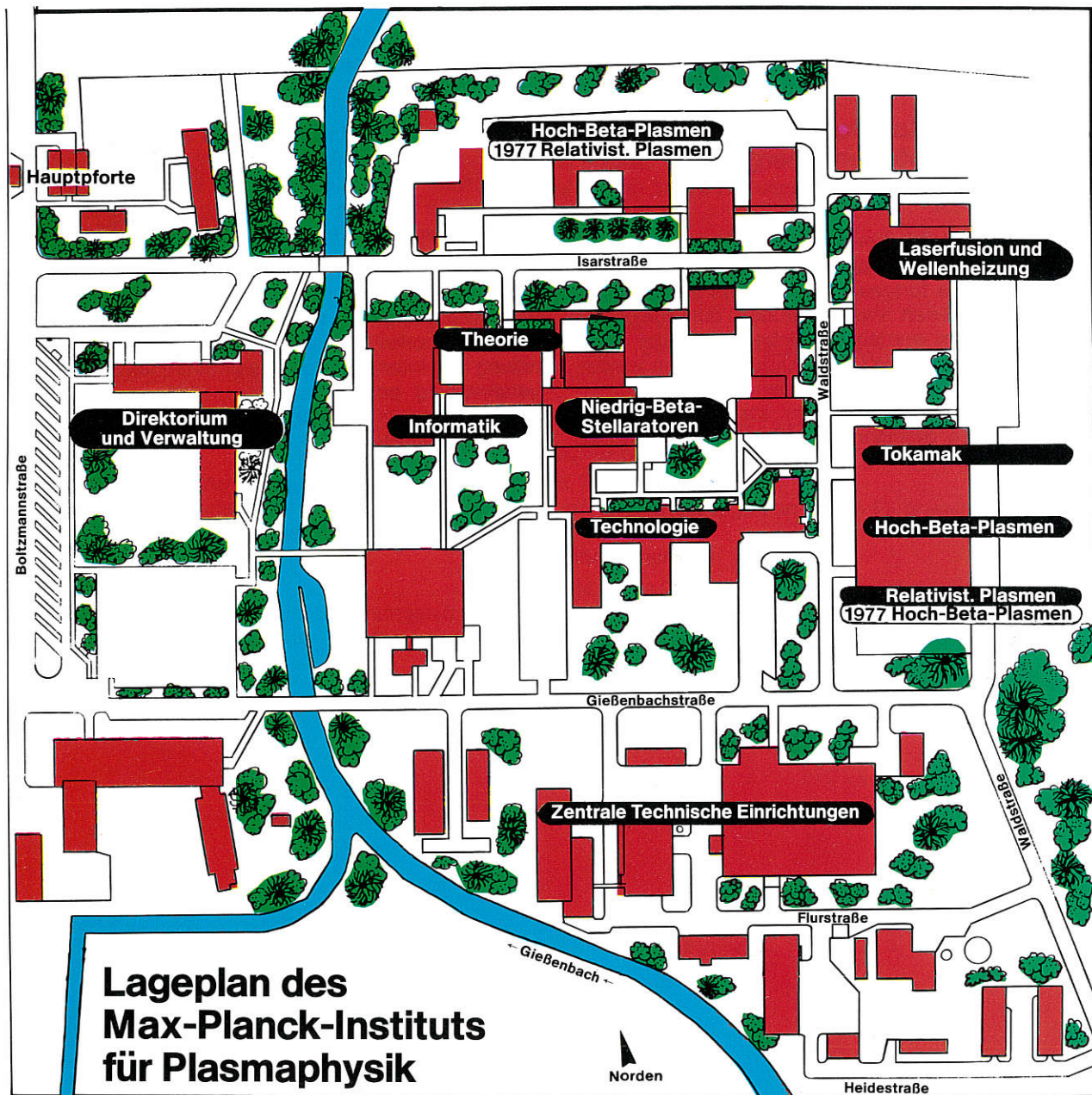
Reproduktionen: Colortechnik GmbH & Co. KG, München

Zeichnungen: Dieter Wunsch BDG, München

Gesamtherstellung: R. Koehler-Druck GmbH & Co. KG, München

© 1977 Copyright by IPP GARCHING

Printed in Germany



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.

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