

JAHRESBERICHT 1972

des

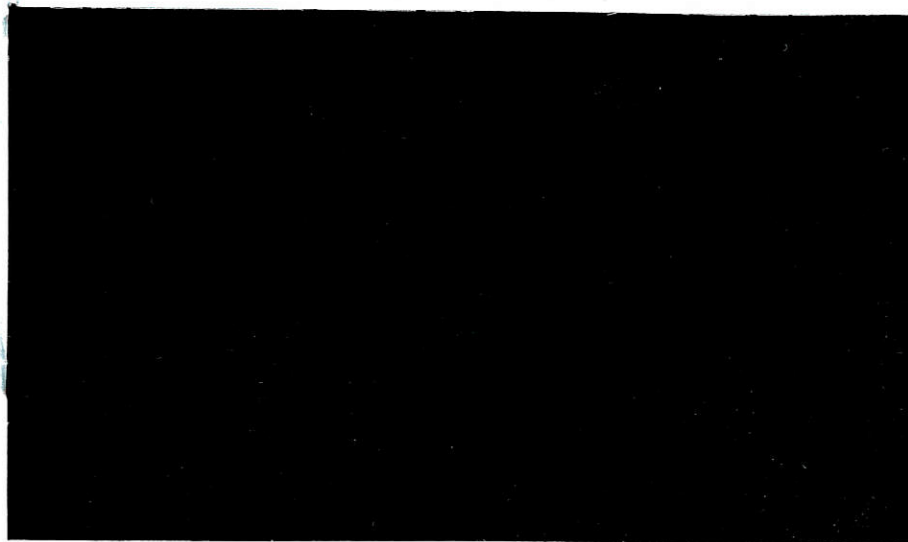
MAX-PLANCK-INSTITUTS FÜR PLASMAPHYSIK

München - Garching

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

764



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 Euratomkommission und alle in deren Namen handelnden Personen:

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

For English translation see inside back cover.

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

JAHRESBERICHT 1972

des

MAX-PLANCK-INSTITUTS FÜR PLASMAPHYSIK

München - Garching



Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

A 35755

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

<u>EINLEITUNG</u>	<u>Seite</u>
<u>EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 1</u>	1
1. Hoch-Beta-Stellarator	3
2. Linearer Theta-Pinch ISAR II	7
3. Dynamische Stabilisierung und dynamisches Gleichgewicht ISAR III	9
4. Belt-Pinch	13
5. Stoßwellenheizung dünner Plasmen - 500 kV-Theta-Pinch	19
6. Meßmethoden an heißen Plasmen	22
7. Numerische Auswertung	24
8. Theoretische Arbeiten	24
<u>EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 2</u>	30
1. Stellarator W II a	31
2. Stellarator W II b	33
3. Stellarator WEGA	37
4. Quadrupol W VI	39
5. Datenverarbeitungsanlage	41
6. Übrige Arbeiten	42
7. Projekt Wendelstein VII	46
<u>EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 3</u>	69
1. Experiment Pulsator	69
2. Theoretische Arbeiten	91
3. RF-Plasmaheizung	93
4. Sonstige Untersuchungen	108
<u>EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 4</u>	110
1. Edelgas-MHD-Generatoren	112
2. Kurzzeit-MHD-Generator	115
3. Erzeugung dichter Plasmen durch Laser	123
4. Laserplasmaquelle für Einschlußexperimente	131
5. Chemische Laser	133
6. Wellen im Plasma	140
<u>THEORIE</u>	158
1. Makroskopisches Gleichgewicht und Stabilität	159
2. Makroskopische numerische Modelle	163
3. Transportphänomene und Turbulenz	165
4. Wellen, Mikroinstabilitäten, Elektronenstrahlen	167
5. Simulation	169

6. Spezielle mathematische Probleme	170
7. Programmentwicklung und Erprobung	171
8. Ausbildung von Programmieren	173
9. Dokumentation, Bibliothek	173
<u>INFORMATIK</u>	175
1. Betrieb der IBM 360/91	175
2. AMOS Entwicklung	179
3. Programmier-Sprachen	180
4. Weitere Projekte	180
<u>OBERFLÄCHENPHYSIK</u>	181
1. Einzeluntersuchungen	181
2. Untersuchungen zur direkten Plasma-Wand-Wechselwirkung	184
3. Entwicklung apparativer Methoden	186
<u>RELATIVISTISCHE PLASMEN</u>	193
1. Das Elektronenringexperiment	193
2. Theoretische Arbeiten	195
3. Experimente zur Weiterentwicklung von 2 MeV Elektronenquellen	196
<u>TECHNIK</u>	199
1. Technische Beiträge zu den experimentellen Arbeiten im Institut	200
2. Forschungsarbeiten über Grundlagen der Plasmatechnik	218
3. Fusionsreakorttechnologie	229
4. Standardgeräte und Bauelemente	240
5. Sonstige Arbeiten	244
6. Zentralwerkstätten	252
<u>GESCHÄFTSFÜHRUNG UND VERWALTUNG</u>	256
<u>VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE</u>	277
<u>LABORBERICHTE</u>	300

Im Berichtsjahr wurde das Forschungsprogramm noch stärker auf die Vorhaben konzentriert, die darauf ausgerichtet sind, die Energiegewinnung durch gesteuerte Kernverschmelzung zu verwirklichen.

Die Arbeitslinie Edelgas-MHD-Generator wurde auf Vorschlag der mit diesem Projekt befaßten Mitarbeiter eingestellt, weil - wie entsprechende Erkundigungen ergeben hatten - bei Kernspaltungsreaktoren nicht in hinreichend kurzer Zeit die erforderlichen hohen Gasantrittstemperaturen von etwa 2000 K erreicht und die Arbeitstemperaturen der Generatoren nicht weiter gesenkt werden können. Die Arbeiten zum Verbrennungs-MHD-Generator (gemeinsames Projekt mit MAN) mußten zum Jahresende auslaufen, nachdem der Antrag auf Förderung des zweiten Projektabschnittes aus dem Titel "Neue Technologien" abgelehnt wurde. Die Gutachter des Forschungsministeriums waren entgegen ihrer früheren Empfehlung nunmehr nämlich der Auffassung, daß ein Kurzzeit-MHD-Generator in absehbarer Zeit keinen eindeutigen technischen und wirtschaftlichen Fortschritt im Vergleich zu bestehenden und erprobten Lösungen verspreche.

Die Aktivitäten auf dem Gebiet der Laserplasmen haben nach den Tagungen in New Orleans und Montreal eine gewisse Wendung erhalten. Seit geraumer Zeit wird im IPP daran gearbeitet, lasererzeugte Plasmen als Ausgangsplasmen für Heiz- und Einschließungsexperimente in toroidalen Konfigurationen zu verwenden sowie die Prozesse der Laserlicht-Plasma-Wechselwirkung zu studieren. In Livermore und Los Alamos durchgeführte theoretische-numerische Arbeiten hatten gezeigt, daß durch geeignete, zeitlich geformte Laserpulse sehr hoher Leistung Kügelchen aus festem Deuterium um einige Größenordnungen in ihrer Dichte komprimiert und damit die Anforderungen an die für ein Zünden eines lasergetriggerten Fusionsreaktors benötigten Laserenergien erheblich reduziert werden könnten. Durch seine bisherigen Aktivitäten auf dem Gebiet der Laserlicht-Plasma-Wechselwirkung, der Hochleistungslaserentwicklung (Chemische Laser, CO₂-Laser) und theoretische Arbeiten hat das Institut eine gute Position erreicht, den Trägheitseinschluß als Alternative zum magnetischen Einschluß auf breiter Basis zu studieren.

Wenn auch die Gruppe Laserplasmen personell durch die Mitarbeiter der MHD-Gruppen verstärkt wurde, liegen doch die Schwerpunktvorhaben des Instituts auf dem Gebiet der toroidalen, magnetischen Einschließung von Fusionsplasmen. Axialsymmetrische und nicht-axialsymmetrische Konfigurationen sowohl im Hoch- β wie im Niedrig- β -Bereich (β : Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfelddruck) werden untersucht.

Der "Hoch-Beta-Stellarator" wurde auf dem gesamten Umfang mit helikalen Zusatzfeldern ausgerüstet. Bei geeigneter Kombination dieser Felder gelang es, eine M + S-ähnliche Konfiguration aufzubauen und die toroidale Drift zu beseitigen. Weitergehende Fragestellungen, insbesondere bezüglich der Stabilität des Plasmagleichgewichtes, müßten an einer neuen Torusanlage untersucht werden. Da beim "Belt-Pinch" die stabile Einschließung bei den niedrigen Plasmatemperaturen durch Diffusion begrenzt ist, wurde bereits im Vorjahr ein größeres Experiment mit zunächst einem 1 MJ-Energiespeicher genehmigt. Ein geeignetes Spulensystem für Belt-Pinch II wurde entwickelt. Der Aufbau des Energiespeichers ist soweit fortgeschritten, daß voraussichtlich im Sommer 1973 mit den Experimenten begonnen werden kann. Da das Institut in den nächsten Jahren gezwungen sein wird, auf dem Hoch- β -Sektor sich auf eine der beiden Linien Belt-Pinch oder Hoch-Beta-Stellarator zu konzentrieren, ist die Planung der beiden nächsten Jahre darauf abgestellt, diese Entscheidung möglichst durch Evidenz experimenteller Resultate zu ermöglichen. Hierzu dient als Voruntersuchung u.a. die schnelle Stoßwellenheizung. Mit dem linearen 500 kV-Theta-Pinch wurden im komprimierten Plasma Ionentemperaturen von 15 keV bei Dichten von einigen 10^{13} cm^{-3} erreicht. Der Umbau in eine toroidale Version (Belt-Pinch-Geometrie) ist begonnen worden.

Auf dem Niedrig- β -Gebiet werden die Linien Tokamak und Stellarator verfolgt. Die erste Tokamak-Apparatur des Instituts ("Pulsator") wurde soweit fertiggestellt, daß Anfang 1973 das erste Entladungsplasma erzeugt werden kann. Eine umfangreiche Diagnostik wurde vorbereitet und für eine schnelle Datenerfassung gesorgt. Vorkehrungen wurden getroffen, das Plasma durch Hochfrequenzstrahlung vorzuionisieren und im Bereich der Ionenplasmafrequenz und der unteren Hybridfrequenz zu heizen. Theoretische Arbeiten betrafen Voruntersuchungen für ein Multipolexperiment, das den materiellen Limiter durch eine immaterielle Separatrix ersetzt, für axialsymmetrische Divertoren im Tokamak und für eine gezielte Verformung des Plasmaquerschnittes.

Die Untersuchungen an den vorhandenen Stellaratoren ("WENDELSTEIN") dienen der Vorbereitung der Experimente im großen Stellarator W II. Für diesen wurde Anfang des Berichtsjahres ein Projektteam gebildet, das die W VII-bezogene Zusammenarbeit mehrerer Abteilungen des Instituts koordiniert. Das mit normalleitenden Hauptfeldspulen ausgerüstete Torusexperiment erhält einen eisenlosen Transformator (mit offener Geometrie) für die Ohmsche Heizung. Für das Vakuumgefäß mit den helikalen Wicklungen wurden umfangreiche Vorversuche zu seiner Herstellung gemacht und die Unterlagen für eine internationale Ausschreibung ausgearbeitet. Die Gerüstkonstruktion, die insbesondere die Eigengewichte und die magnetischen Kräfte aller Spulen aufnehmen muß, wurde ausschreibungsreif fertiggestellt. Die Vorarbeiten für den speziell für Heizexperimente konzipierten Stellarator "WEGA" sind so weit fortgeschritten, daß mit seiner Inbetriebnahme in Grenoble Mitte 1974 gerechnet werden kann. Nach dem Umbau von W IIa werden TTMP-Heizversuche (Transit Time Magnetic Pumping) im Bariumplasma studiert. Gemeinsam mit der Ecole Royale Militaire in Brüssel und mit CEN-Grenoble wird in der Versuchsreihe "HF-Absorptionsspektroskopie" noch geeignetere Absorptionsbanden für die Energiekopplung in das Plasma gesucht. Bei festliegender Wellenlänge sind dann in WEGA Heizexperimente mit höherer Leistung vorgesehen, um stellaratorspezifische Untersuchungen für W VII zu haben. In W IIb wurden sehr erfolgreiche Wasserstoffplasmen durch direkten Stromdurchgang durch das Plasma geheizt. Bei 1 m Seelendurchmesser und einigen cm Plasmadurchmesser und einem Magnetfeld von nur 0.7 Tesla wurden bereits Elektronentemperaturen von 100 eV in Plasmen von $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ Dichte erreicht. Zur Plasmavorionisierung kamen dabei teils Lisitano-Spulen und teils ohmsche Heizungstransformatoren mit geeignetem Spannungsprogramm zum Einsatz, um die run-away-Elektronen in der Anfangsphase der Entladung auszuschalten. Es wurde theoretisch gezeigt, daß nichtebene, elliptisch verformte Magnetspulen die helikalen Wicklungen eines konventionellen Stellarators simulieren und damit das Vakuumrohr von magnetischen Kräften entlasten können.

Da für die Laserlicht-Plasma-Wechselwirkung Hochleistungslaser benötigt werden, wurde vor einigen Jahren mit der Entwicklung chemischer Laser begonnen. Das Programm ist einerseits kurzfristig auf experimentelle Anwendung gerichtet. Das Potential des Jodlasers als Hochleistungslaser wurde nachgewiesen. Mit der Entwicklung einer 1 kJ-Laseranlage wurde begonnen. Andererseits werden grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet der chemischen Laser weitergeführt, die erst langfristig zu einer Hochleistungslaserentwicklung führen.

Der Wechselwirkung zwischen Ionen und schnellen Neutralteilchen mit Metallen im Hinblick auf künftige große Plasmaexperimente und auf Fusionsreaktoren wird große Bedeutung beigemessen. Den Zerstäubungsprozessen, der Ionenrückstreuung, den Veränderungen in der Oberflächenstruktur, den beschußinduzierten Strahlenschäden sowie der Blasenbildung gilt daher besonderes Interesse.

In der Abteilung Theorie, die teils die Experimentatoren bei der Vorbereitung neuer Experimente und bei der Interpretation der gewonnenen experimentellen Ergebnisse unterstützt, und teils grundlegende Fragen der Plasmatheorie behandelt, wurden Rechnungen zum MHD-Gleichgewicht und zur Stabilität von Plasmen angestellt. Dem axialsymmetrischen Gleichgewicht galt das vornehmliche Interesse. Die Plasmasimulationsrechnungen wurden intensiviert, die numerische Behandlung toroidaler Systeme vorbereitet.

In der Abteilung Technik hat sich neben der technischen Unterstützung der experimentellen Abteilungen eine stärkere Hinwendung zur fusionsreaktorrelevanten Technologie vollzogen. Im Vorjahr begonnene Systemstudien wurden intensiviert und den Fragen Tritiumhandhabung, Wandbelastung, den Kühlproblemen und der Magnetfeldtechnik verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet.

Im Bemühen um die technische Verwirklichung eines neuen Beschleunigerprinzips wurden nach Abschluß des ersten erfolgreichen Experimentierabschnittes Ringe mit 6×10^{12} Elektronen und "inneren" Feldstärken von 15 MV/cm erreicht. Ein erweitertes Experiment wurde aufgebaut, bei dem eine Beschleunigungsstrecke für mit Ionen beladene Elektronenringe vorgesehen ist.

Im Berichtsjahr richtete das IPP zwei internationale Tagungen aus, auf denen ein Überblick auf den Gebieten Hoch- β -Plasmen und Plasma-Wand-Wechselwirkung gegeben wurde.

EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 1

(Prof. E. Fünfer)

Sowohl am Hoch-Beta Stellarator als auch am Band-Pinch wurden im Jahre 1972 wesentliche Ergebnisse erzielt. Dabei ergab sich, daß weiterführende Fragestellungen, etwa nach der Stabilität für längere Zeiten, mit den vorhandenen Anlagen ISAR T 1 und ISAR IV nur noch ganz beschränkt beantwortet werden können. Bereits im Vorjahr war deswegen der Beschluß gefaßt worden, eine wesentlich größere Band-Pinch Batterie zu entwickeln. Der Aufbau dieser Batterie machte im Jahre 1972 gute Fortschritte und wird Mitte 1973 beendet sein.

Eine ähnliche Situation liegt beim Hoch-Beta-Stellarator ISAR T 1 vor. Auch hier haben experimentelle und theoretische Untersuchungen zu der Einsicht geführt, daß eine neue und auch in der Gesamtkonzeption wesentlich veränderte Anlage aufgebaut werden muß. Überlegungen dazu sind bereits seit einiger Zeit begonnen und so weit fortgeführt worden, daß im Jahre 1973 ein Projektvorschlag vorliegen kann.

Die Experimente am Torus ISAR T 1 haben ergeben, daß bei geeigneter Kombination des Hauptfeldes mit helischen Feldern ($l = 0;1;2$) die toroidale Drift beseitigt werden kann. Als störender Effekt tritt dabei unter bestimmten Verhältnissen eine Wandberührung des Plasmas zu Beginn der Entladung auf. Zu diesem Zeitpunkt beobachtet man nämlich gedämpfte Schwingungen des Plasmas um die helische Gleichgewichtslage mit Amplituden, die zur Wandberührung führen. Die konsequenteste, aber auch schwierigste Abhilfe wäre ein helisch geformtes Gefäß. Die technische Realisierbarkeit dieses Vorschlages wird bereits untersucht.

Die MHD-Theorie ist durch die Ergebnisse sowohl am linearen als auch am toroidalen Hoch-Beta-Stellarator in ihren wesentlichen Aussagen bestätigt worden. Eine Anwendung der MHD-Theorie zeigt unter der Annahme eines Plasmas mit scharfer Oberfläche, daß bei einer bestimmten Wahl von Plasmaparametern, nämlich Kompressionsverhältnis, Aspektverhältnis und Verhältnis Helixradius zu Plasmaradius eine Wandstabilisierung der ($m = 1$)-Mode erreicht werden kann. Die wesentlichste Voraussetzung ist dabei ein sehr kleines Kompressionsverhältnis, etwa in der Größe von 2. Dies ist nur denkbar, wenn die Aufheizung durch schnelle Stoßwellen geschieht und eine weitere adiabatische Kompression nicht mehr erfolgt.

Der Band-Pinch ermöglicht im Gegensatz zum Hoch-Beta Stellarator ein toroidales Hoch-Beta Gleichgewicht unterhalb der Kruskal-Grenze bei sehr kleinem Aspektverhältnis. Die seitherigen Versuche haben gezeigt, daß bis zu etwa 100 μ sec MHD-stabile Plasmen beobachtet werden können. Die Einschlußzeit ist hier vermutlich nicht durch makroskopische Instabilitäten, sondern durch Diffusion begrenzt. Diese Zeit ist wegen der bisher sehr niedrigen Plasmatemperaturen auf 80 - 100 μ sec beschränkt. Um den Übergang zu höheren Temperaturen und damit zu längeren Einschlußzeiten zu ermöglichen, wurde im vergangenen Jahr ein neues Band-Pinch Experiment entwickelt und teilweise aufgebaut. Bei einem Energieinhalt von etwa 1 MJ sollen mit diesem Band-Pinch II Untersuchungen über das Stabilitäts- und Diffusionsverhalten bis zu Zeiten von etwa 1 msec durchgeführt werden.

Ein wesentlicher Teil der Arbeit des Jahres 1972 bestand neben Untersuchungen zur Stabilitätsgrenze bei kleinen q -Werten am Band-Pinch I (ISAR IV) in der Entwicklung eines geeigneten Spulensystems für den Band-Pinch II.

Überlegungen auf der Grundlage der MHD-Theorie haben die Existenz von Band-Pinch Gleichgewichten gezeigt, die den experimentell gefundenen sehr ähnlich sind. Stabilitätsuntersuchungen nach dem Sobolew-Kriterium haben für ein spezielles Gleichgewicht Stabilität auch gegen lokalisierte Moden gezeigt. Erste Überlegungen zur Diffusion sind mit der beobachteten Lebensdauer des Plasmas vereinbar.

Die Stoßwellenheizung von Plasmen wurde zunächst im Bereich sehr dünner Plasmen bei Anfangsdichten von etwa 10^{12} cm^{-3} mit dem 500 kV Theta-Pinch Experiment in linearer Geometrie durchgeführt. Dabei ergaben sich bei einer Anfangsdichte von $1,3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ folgende Werte für das komprimierte Plasma: Dichte $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, Ionentemperatur 15 keV. Da für die Anwendung im Fusionsreaktor wesentlich höhere Dichten erforderlich sind, werden die Versuche in dieser Richtung erweitert. Die Erzeugung heißer Plasmen mit kleinem Kompressionsverhältnis durch Stoßwellen läßt auch die Frage der Plasma-Wand Wechselwirkungen auftreten. Ihre Beantwortung erfordert längere Einschlußzeiten als sie im linearen 500 kV Experiment erreicht werden können. Auch der Einfluß der Enden erschwert dabei die Interpretation der Ergebnisse. Es ist deshalb der Umbau dieses Experimentes in eine toroidale Band-Pinch Konfiguration begonnen worden. Aus diesen Versuchen werden Ergebnisse erwartet, die besonders für den Band-Pinch II wesentlich sind, z. B. für die technisch erreichbaren Temperaturen.

An der Batterie ISAR II sollen in einem linearen Experiment speziell die Fragen beantwortet werden, die sich bei der Stoßwellenheizung am geplanten, neuen Hoch-Beta Stellarator ergeben.

Bei der dynamischen Stabilisierung wurden am Screw-Pinch Untersuchungen mit räumlich homogenen und inhomogenen, modulierten Magnetfeldern vorgenommen. Stabilisierung der ($m = 1$)-Mode mit homogenen Feldern an einem Torussektor wurde demonstriert.

Bei der Plasmadiagnostik lag der Schwerpunkt der Arbeiten bei den Infrarottechniken. Für Streuexperimente wurde ein Hochleistungs- CO_2 -Laser entwickelt. Die Anwendbarkeit der holographischen Interferometrie bei $3 \mu\text{m}$ Wellenlänge wurde gezeigt. Dazu wurden ein HF-Laser und geeignete Flächendetektoren entwickelt.

1. Hoch-Beta-Stellarator

Beim Hoch-Beta-Stellarator soll das Gleichgewicht eines stoßwellengeheizten Plasmas ohne toroidalen Nettostrom untersucht werden. Im Gegensatz zum klassischen (M+S)-Gleichgewicht haben die hier untersuchten Gleichgewichte keine ebene Seele mehr. Die wesentlichste Verformung der Plasmaoberfläche ist aus Stabilitätsgründen eine schraubenförmige Verformung des Plasmas ($\ell = 1$ -Stellarator). Das toroidale Gleichgewicht wird durch zusätzliche ($\ell = 0$)- und ($\ell = 2$)-Verformungen erreicht. In dem toroidalen Experiment ISAR T 1 sollte dieses Gleichgewicht und soweit wie möglich seine Stabilität untersucht werden.

1.1 ISAR T 1 - Sektorexperiment

(E.Fünfer, M.Kaufmann, W.Lotz, J.Neuhauser, G.Schramm, U.Seidel)

Nach einer Untersuchung der Vorionisierung in der toroidalen Anordnung (s. unten) wurde das toroidale Gleichgewicht zunächst in einem 1/4-Sektor des Torus untersucht. Dieser Sektor war mit ($\ell = 1$) und ($\ell = 2$) - Leiterwicklungen ausgestattet. Stufenweise Erhöhung der Stellaratorströme bewirkte zwar eine Verminderung der toroidalen Drift, jedoch kein vollständiges Gleichgewicht /IPP 1/127, A 2/. Erst durch Hinzufügen von relativ schwachen ($\ell = 0$)-Feldkomponenten (durch feste Spuleneinsätze) konnte die toroidale Drift vollständig kompensiert werden. Obwohl in diesem Sektorexperiment grundsätzlich die Kompensation der toroidalen Driftkraft durch die Interferenz von ($\ell = 1$)-Feldern mit ($\ell = 2$)- und ($\ell = 0$)-Feldern gezeigt wurde, blieb eine Reihe von ungeklärten Beobachtungen zurück, die wahrscheinlich auf Endinflüsse des Sektors zurückzuführen sind.

1.2 ISAR T 1 - Torusexperiment

(E.Fünfer, M.Kaufmann, W.Lotz, J.Neuhauser, G.Schramm, U.Seidel)

Mit den technischen Erfahrungen des Sektorexperiments wurde ein voller Torus mit ($\ell = 1$)-, und ($\ell = 2$)-Wicklungen und ($\ell = 0$)-Spuleneinsätzen ausgestattet ($\delta_1 \leq 1,5$, $\delta_2 \leq 0,3$, $\delta_0 \approx 0,06$, 24 Perioden des ($\ell = 1$)-Feldes).

Die Ende des Jahres anlaufenden Experimente mit einer Kombination aller Felder haben dann folgendes ergeben:

- 1) Bei ausreichender Stärke der helischen Felder läßt sich die toroidale Drift beseitigen. Abb.1 zeigt Bahnkurven des Zentrums der Plasmahelix in Richtung der toroidalen Drift ohne (d) und mit helischen Feldern (von a nach c abnehmend).
- 2) Es wurde eine Drift der Plasmahelix senkrecht zur toroidalen Drift, d.h. parallel zur Hauptachse des Torus beobachtet. Diese Drift könnte durch Spiegelströme der helischen Leiter in den ($\ell = 0$)-Einsätzen erklärt werden. Durch eine unsymmetrische Einspeisung in die aus jeweils drei Leitern bestehende ($\ell = 1$)-Leiterhelix konnte diese Drift sowohl beseitigt (-15°) als auch verstärkt ($+15^\circ$) werden (vgl. Abb.2).

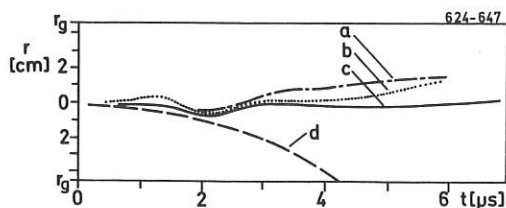


Abb. 1: Weg-Zeit-Kurven der Helix in Richtung der toroidalen Drift ohne und mit verschiedenen Stellaratorfeldern.

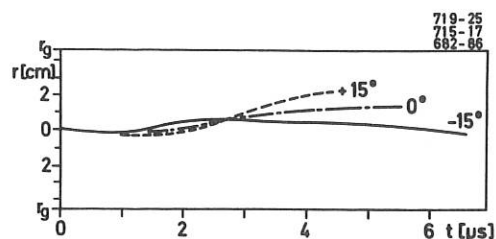


Abb. 2: Weg-Zeit-Kurven der Helix parallel zur Hauptachse des Torus.

- 3) Die Lebensdauer des Plasmas wurde in diesem Experiment durch ein zeitliches Aufweiten der Helix und dadurch verursachten Wandkontakt begrenzt. Ursache für das zeitliche Aufweiten der Helix war eine nicht ausreichend gute Abstimmung der helischen Felder und des Grundfeldes in ihrem zeitlichen Verlauf. Durch einfache technische Änderungen kann dieser Fehler beseitigt werden.

1.3 Lineare Experimente mit ($\ell = 1$)-Feldern

(W.Grossmann, M.Kaufmann, J.Neuhauser)

In den Vorjahren wurden helische ($\ell = 1$)-Konfigurationen in verschiedenen Experimenten untersucht^{1), 2)}. Zusammengefaßt hatten diese Untersuchungen folgendes ergeben:

- 1) Das durch einen Theta-Pinch erzeugte Plasma nimmt im Gleichgewicht - wie erwartet - die Form einer Helix an.
- 2) Es wurden gedämpfte Schwingungen um die helische Gleichgewichtslage beobachtet, deren Frequenz mit der MHD-Theorie übereinstimmt.
- 3) Teilweise wurden in Übereinstimmung mit der MHD-Theorie ($m = 1$)-Instabilitäten beobachtet, teilweise traten diese Instabilitäten nicht wie erwartet auf.

Eine weitere Diskussion dieser Ergebnisse hat nun in zwei Punkten eine Klärung ergeben. Einmal konnte die beobachtete Dämpfung der helischen Schwingungen theoretisch erklärt werden³⁾. Während die Viskosität und der endliche Widerstand des Plasmas nicht zur Erklärung der Dämpfung ausreichen, ergibt sich eine Dämpfung der helischen Schwingungen durch die unterschiedliche Phasengeschwindigkeit und anschließende Phasenmischung in der Randschicht.

- 1) M.Kaufmann, E.Fünfer, J.Junker, J.Neuhauser, IPP-Report 1/111 (1970)
- 2) E.Fünfer, M.Kaufmann, W.Lotz, J.Neuhauser, Proc. Plasma Phys. Contr. Nucl. Fus. Res. (1971), III, 189.
- 3) W.Grossmann, M.Kaufmann, J.Neuhauser, Veröffentlichung eingereicht

Weiterhin konnte das Stabilitätsverhalten des helischen Plasmas ausreichend in Übereinstimmung mit der MHD-Theorie gebracht werden, wenn Einflüsse berücksichtigt werden¹⁾. In der Abb.3 sind experimentelle (Kästchen) und theoretische (ausgezogene Linien) Werte für die Anwachsraten der ($m = 1$)- Instabilität als Funktion von β einander gegenübergestellt.

Zusammenfassend haben die linearen (1.3) und bisherigen toroidalen (1.2) Experimente eine gute Bestätigung der MHD-Theorie ergeben.

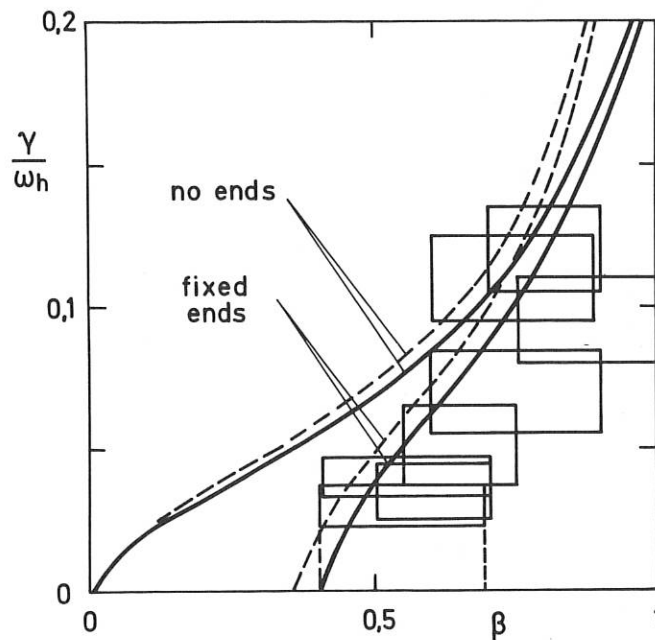


Abb.3: Anwachsraten der ($m = 1$) Mode normiert auf die Frequenz der helischen Schwingungen als Funktion von β , Kästchen $\hat{=}$ exp.Werte, ausgezogene Linie $\hat{=}$ theor.Werte.

1.4 Toroidale Vorionisierung

(M.Kaufmann, M.Münich, J.Neuhauser, U.Seidel)

In der ersten Stufe wird das Füllgas nach einer von Wilhelm²⁾ vorgeschlagenen Methode durch eine HF-Entladung (≈ 15 MHz) schwach vorionisiert. Die eigentliche Vorionisierung erfolgt anschließend durch einen Z-Pinch. Durch einen besonders geformten Stromimpuls wird dabei erreicht, daß kein toroidaler Nettostrom zurückbleibt³⁾. Der Vorionisationsgrad wurde interferometrisch bei 3,4 μ und 1 mm Wellenlänge gemessen. In Abb.4 ist der Vorionisationsgrad α als Funktion der Zeit t aufgetragen. Durch eine Variation des Vorionisationsgrades zum Zündzeitpunkt der Hauptentladung ließ sich der β -Wert der Hauptentladung in weiten Grenzen variieren. In der Abb.5 wird erkennbar, daß der β -Wert zwischen 1 und 70 % eingestellt werden kann. Diese Variationsmöglichkeit wird es gestatten, die MHD-Theorie in einem weiten Bereich zu prüfen.

1) E.Fünfer, M.Kaufmann, W.Lotz, J.Neuhauser, G.Schramm, U.Seidel, IPP-Report 1/130(1973)

2) R.Wilhelm, private Mitteilung

3) M.Kaufmann, W.Lotz, M.Münich, J.Neuhauser, U.Seidel, IPP-Report in Vorbereitung

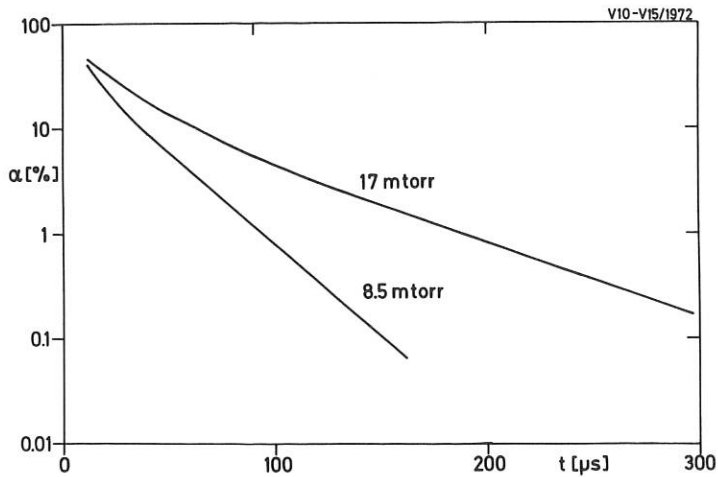


Abb.4: Der Ionisationsgrad als Funktion der Zeit im "After glow" der z-Pinch Vorionisierung.

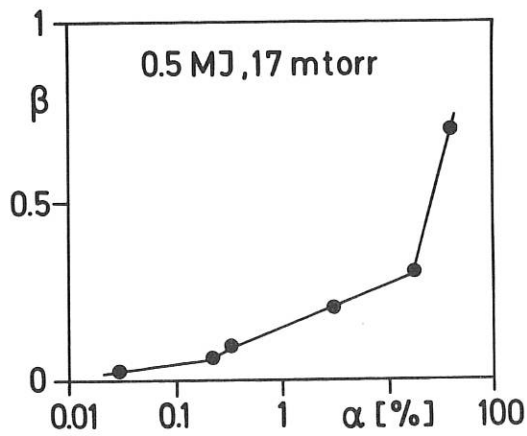


Abb.5: β als Funktion des Ionisationsgrades

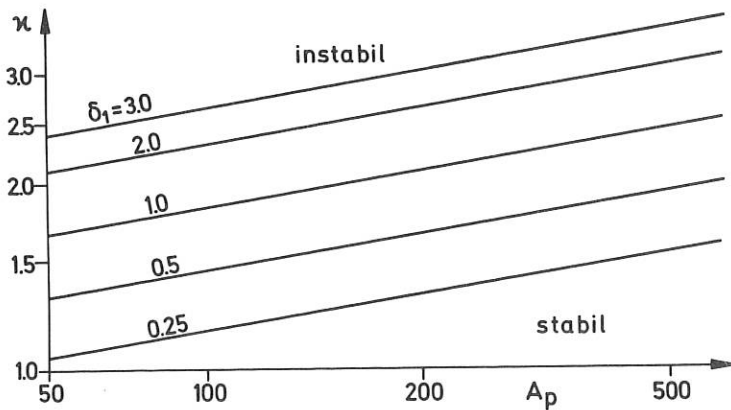


Abb.6: Stabilitätsgrenzen der ($m = 1, K = 0$) Mode in Abhängigkeit vom Aspektverhältnis $A_p = \frac{R_T}{R_P}$, dem Kompressionsverhältnis $\kappa = \frac{R_w}{R_P}$ und der helischen Verformung $\frac{R_H}{R_P}$.

1.5 Abschätzungen zum Wandstabilisierten Stellarator

(F.Herrnegger, M.Kaufmann)

Die für scharfe Plasmaoberflächen ausgeführte MHD-Theorie zeigt eine Wandstabilisierung der ($m = 1$)-Mode für kleine Kompressionsverhältnisse κ . Unter Annahme dieser Theorie wurden die Stabilitätsgrenzen als Funktion des Kompressionsverhältnisses, des Aspektverhältnisses A_p (= Torusradius/Plasmaradius) und der ($\ell = 1$)-Verformung δ_1 (= Helixradius/Plasmaradius) ausgerechnet. Der β -Wert, die anderen helischen Verformungen (δ_0, δ_2) und die Periodenlängen wurden dabei optimiert. Die Abb.6 zeigt das Ergebnis dieser Rechnung. Stabilität ließe sich mit dem Parametersatz $\kappa = 2$, $\delta_1 = 1$ und $A_p = 200$ erreichen.

1.6 Verwendung eines Eisentrafos zur Magnetfeldformung

(U.Seidel)

Um ein Kompressionsverhältnis von ungefähr 2 mit einer Pinchentladung zu erreichen, darf das Magnetfeld nur während der ersten Implosion des Plasmas ansteigen. Bei Dichten von einigen 10^{21} m^{-3} , einem Gefäßradius von etwa 10 cm und einer angestrebten Temperatur $T_i \approx 2 \text{ keV}$ ergeben sich dabei Anstiegszeiten des Magnetfeldes von ca. 0,5 μs . Obwohl die Magnetfelder nicht hoch sind ($\approx 2 \text{ Tesla}$) kann man Schwierigkeiten erwarten, das Magnetfeld mit einem konventionellen Crowbar-System ausreichend lange konstant zu halten. Eine Lösung dieses Problems könnte durch die Benutzung eines eisengefüllten Transformators zwischen Batterie und Spule erreicht werden. Durch geeignete Dimensionierung müßte gewährleistet sein, daß das Eisen genau zum Zeitpunkt der 1. Kompression gesättigt wird. Damit wird der Sekundärkreis mit der Spule von dem mit einem konventionellen Crowbar ausgestatteten Batteriekreis abgekoppelt. Der Strom im Primärkreis kann weiter ansteigen, würde kurzgeschlossen werden und erst nach einem Abfall auf den geringeren Stromwert des Sekundärkreises wieder auf diesen zurückkoppeln. Während dieser Zeit von vielleicht 100 μs würde das Magnetfeld in der Spule sehr konstant bleiben. Es kann sogar daran gedacht werden, über den Transformator einen Power-Crowbar einzuspeisen, um so die nutzbare Zeit weiter zu verlängern.

2. Linearer Theta-Pinch ISAR II

(W.Engelhardt, W.Köppendörfer, M.Münich, W.Schneider, J.Sommer)

Die Untersuchung der Energiebilanz von linearen Theta-Pinch-Plasmen wurde Anfang 1972 fortgesetzt und durch allgemeinere Überlegungen erweitert. Die Ergebnisse der Energieverlustmessungen an ISAR II und ergänzende Rechnungen mit dem Schneider-Modell wurden mit anderen linearen Theta-Pinch-Experimenten verglichen. Es zeigte sich dabei, daß sich alle Experimente in ein Diagramm einordnen lassen, dessen Ordinate das Produkt $n \cdot L$ aus Plasmadichte und Spulenlänge und dessen Abszisse die Ionenenergie (senkrecht zum Feld) ist (Abb.7). In diesem Diagramm kann man drei Bereiche unter-

scheiden, die durch zwei parallele Gerade getrennt sind. Die eine Gerade ergibt sich durch Gleichsetzen der Ionenausströmzeit mit der axialen Wärmediffusionszeit der Elektronen und die andere Gerade durch Gleichsetzen der Ionenausströmzeit mit der Ion-Ionrelaxationszeit. Im ersten Bereich mit niedriger Ionentemperatur und großen

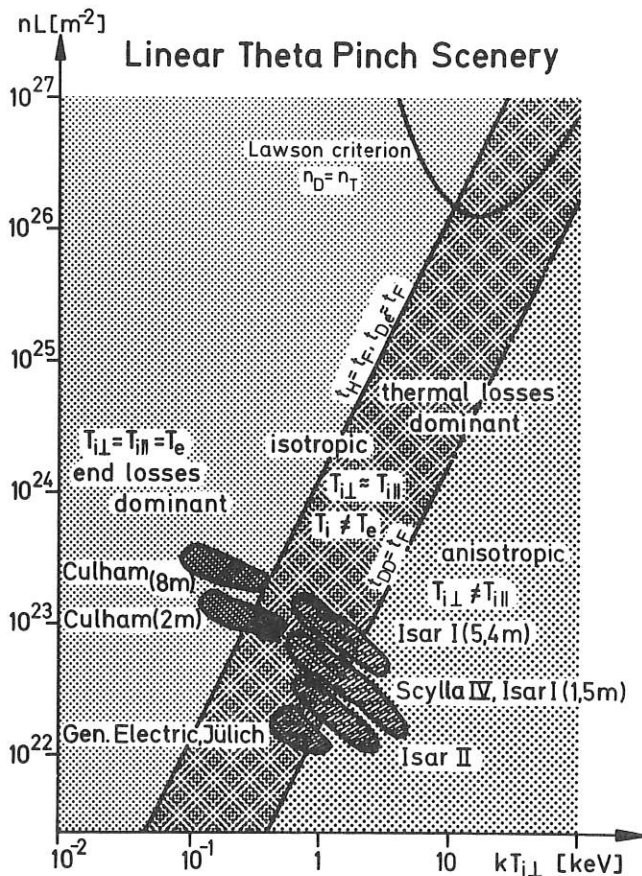


Abb. 7: Vergleich der Eigenschaften verschiedener linearer Theta-Pinch-Experimente.

scheiden, die durch zwei parallele Gerade getrennt sind. Die eine Gerade ergibt sich durch Gleichsetzen der Ionenausströmzeit mit der axialen Wärmediffusionszeit der Elektronen und die andere Gerade durch Gleichsetzen der Ionenausströmzeit mit der Ion-Ionrelaxationszeit. Im ersten Bereich mit niedriger Ionentemperatur und großen $n.L$ - Werten sind die Plasmaenergien isotrop und die Elektronenenergie ist nicht durch die Wärmeleitung bestimmt. Im zweiten Bereich mit mittleren Ionentemperaturen und mittleren $n.L$ - Werten werden die Elektronen durch axialen Wärmekontakt gekühlt. Im dritten Bereich, mit hoher Ionentemperatur senkrecht zum Feld, ist die Ionenenergieverteilung anisotrop und die Elektronentemperatur durch Wärmeleitung begrenzt. Da sich die durch die Kompression erzielbare Ionentemperatur mit Hilfe der Batteriedaten und der Fülllichte leicht abschätzen läßt, können die wichtigsten Eigenschaften von Theta-Pinch-Plasmen mit der skizzierten Darstellung zutreffend gekennzeichnet werden.

Schließlich wurden die Überlegungen auf lineare Reaktoren erweitert, die von verschiedenen Seiten zur Diskussion gestellt worden waren^{1), 2)}. Rechnungen mit einem auf α -Teilchenheizung erweiterten Schneider-Modell ergaben als Mindestlänge zur Erfüllung des Lawson-Kriteriums, bei noch realisi-

sierbaren Feldern, die Länge von 1.5 km. Eine Modulation des Magnetfeldes in Form periodischer Spiegelfelder bringt nach den Rechnungen, die im Gegensatz zu²⁾ die axiale Strömung richtig, aber die Reibung nur pauschal erfaßten, lediglich eine Reduktion der Länge auf etwa die Hälfte.

Ein Teil der experimentellen Arbeit an ISAR II war der genaueren Vermessung der Resonanz- und Interkombinationslinien der heliumähnlichen Ionen von CV bis Ne IX gewidmet. Um eine sichere Interpretation der Ergebnisse zu gewährleisten, ist eine möglichst genaue Kenntnis der Elektronendichte und Elektronentemperatur erforderlich. Deshalb wurden zum zweitenmal Laserlicht-Streumessungen unter 90° durchgeführt. Die Ergebnisse werden zur Zeit ausgewertet.

1) J.M.Lawson, et. al.; Madison Conference Proceedings, Vol. I, p.673 (1971)

2) G.J.Budker, V.V.Mirnow, D.D.Ryntov, JETP Lett. 14, 212 (1971)

Zur Ergänzung der früher an ISAR II durchgeführten Strahlungsverlustmessungen wurden zusammen mit D.Düchs von der Abteilung Theorie die Strahlungsverluste durch Sauerstoff in nicht stationären Plasmen berechnet, ähnlich wie von Yn.Galushkin et al.¹⁾ berichtet wird.

Dabei wurde insbesondere die Dichtegrenze ermittelt, bis zu welcher eine von der Dichte nur mittelbar abhängige Skalierung möglich ist.

In Zukunft wird ISAR II zur Erzeugung heißer Plasmen mit niedrigem Kompressionsverhältnis verwendet werden. Da dabei weitgehend auf eine adiabatische Nachkompression verzichtet werden muß, muß der zunächst sinusförmige Magnetfeldverlauf trapezförmig abgeschnitten werden. Wie das mit Hilfe eines bis in die Sättigung betriebenen Transformators erreicht werden kann, wird z.Z. untersucht (s.Abschn.1.6). Um das Problem der Vorionisierung zu lösen, wurde außerdem ein eigenes Vorionisierungsexperiment aufgebaut.

3. Dynamische Stabilisierung und dynamisches Gleichgewicht ISAR III.

(G.Becker, A.Eberhagen*, O.Gruher, F.Hartz, H.Herold)

3.1 Dynamische Stabilisierung mit der Magnetfeldkonfiguration einer stehenden Welle

Die Untersuchungen wurden an einem linearen Screw-Pinch Plasma ausgeführt mit dem Ziel, die $m = 1$ Instabilität zu unterdrücken. Es lagen theoretische Arbeiten zu Grunde²⁾, die eine stabilisierende Wirkung dieses Systems vorhersagen, wenn Frequenz und Hub in den Bäuchen der stehenden Welle, $\delta_0 = \frac{r_p}{r}$, ausreichend groß sind:

Die experimentellen Untersuchungen wurden in 2 Versionen durchgeführt: Im 1. Experiment wurde die stehende Welle ($\lambda = 29$ cm) einem 175 cm langen Plasma überlagert. Dabei wurden relative Feldhübe in den Wellenbäuchen, $\epsilon = B_z/B_z \approx 0,12$ bei einer Kreisfrequenz von $6,6 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ erreicht. Im 2. Experiment wurde die Länge des Screw-Pinch auf 1,1 m verkürzt, um noch höhere Feldhübe ($\epsilon = 26\%$) zu erreichen. Die stehende Welle wurde durch gegenphasig gespeiste Schleifen erzeugt, die äquidistant in die Kompressionsspule eingelagert waren. Als Energiequelle diente ein speziell entwickelter HF-Kreis, der mit Hoch-Q Kondensatoren und Metallkontaktschaltern ausgerüstet war.

Die Plasmaparameter in beiden Experimenten waren: $T_e \approx T_i \approx 60$ eV; $\beta = 0,3$ und $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Die Plasmabewegungen im Wellenbauch (δ_0) wurden durch densitometrische Auswertung von Schmieraufnahmen bestimmt. Es ergab sich $\delta_0 = 0,8 \epsilon$.

Obwohl δ_0 den theoretisch geforderten Wert bis zum 2,5-fachen übertraf und auch die Frequenzbedingungen gut erfüllt waren, konnte in keinem der Experimente eine stabilisierende Wirkung der stehenden Welle auf die helische $m = 1$ Instabilität beobachtet werden. Wahrscheinlich ist das theoretische Modell zu sehr idealisiert, insbesondere, da es linearisierte MHD-Gleichungen benützt und somit starke Effekte direkter Verkopplung von Moden vernachlässigt (s. Abschnitt 3,4). Eine parametrische Anregung stabiler Moden wurde nicht festgestellt. Die Ergebnisse wurden auf der EPS-Konferenz in Grenoble vorgetragen /10/.

1) Yn.L.Galushkin, et al., Madison Conference Proceedings, Vol.II, 407 (1971)

2) G.Berge, P.Freidberg,; Phys. Fluids 14, 1035 (1971)

*) bis Sept.1972 Gast bei Texas Techn University Lubbock, Texas.

3.2 Dynamisches Gleichgewicht eines θ -Pinch Plasmas in einem Torussektor

Wird die Magnetfeldkonfiguration einer stehenden Welle auf einen toroidalen θ -Pinch angewandt, so ist nach Wolf und Berge¹⁾ ein dynamisches Gleichgewicht zu erwarten, wenn $\frac{1+Y^2}{4} n^2 \delta_o^2 \geq \frac{\beta}{\Delta R_T}$ (1) erfüllt ist. Dabei ist Δ die Versetzung des Plasmas gegen die Torusseule, R_T der große Torusradius, $h = \frac{2\pi}{\lambda}$ die Wellenzahl der stehenden Welle und $Y \approx 2$.

Das in einem Torussektor (Sektorwinkel 21° ; Aspektverhältnis $A = 74$; $R_T = 400$ cm;) erzeugte θ -Pinch Plasma hatte die gleichen Parameter wie in 3.1. Die Kreisfrequenz der stehenden Welle, ω_s war mit $5,5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ ausreichend hoch, um die zusätzlichen Bedingungen: Driftzeit des Plasmas zur Wand $\tau_o \gg \frac{2\pi}{\omega_s}$ und $\omega_s \gg hV_A$ zu erfüllen. Der gekrümmte Spulenmittelteil war an jedem Ende durch ein 75 cm langes gerades Spulenstück verlängert, so daß der Einfluß der Enden während der Experimentierzeit vernachlässigbar war. Nach (1) sollte für obige Plasmaparameter bereits bei einem Feldhub ϵ von 10 % ein Gleichgewicht bei $\Delta = 1$ cm erreicht werden. Obwohl ϵ bis auf 18 % gesteigert wurde, driftet das Plasma unbeeinflusst zur Gefäßwand. Ein dynamisches Gleichgewicht konnte nicht erreicht werden, d.h. mit einer stehenden Welle kann - wie bei den Experimenten zur dynamischen Stabilisierung - die vorhergesagte dynamische Kraft nicht erzeugt werden.

3.3 Dynamische Stabilisierung an einem Screw-Pinch-Torussektor

Die am linearen Screw-Pinch zur Stabilisierung der helischen $m = 1$ Instabilität erfolgreich benutzten \tilde{B}_z -Felder wurden nun auf einen toroidalen Screw-Pinch (Sektor) angewandt. Die besondere Schwierigkeit dieser Versuche liegt darin, daß nun gleichzeitig Stabilität und Gleichgewicht erreicht werden müssen. Abschätzungen unter Verwendung der früher gewonnenen Skalierungsbedingungen zeigen, daß mit den derzeitigen technischen Mitteln eine Stabilisierung nur bei großem Aspektverhältnis des Torus durchführbar ist. Aus Kostengründen wurden die Versuche deshalb an einem Torussektor durchgeführt. Dabei fand der im Abschnitt 3.1 kurz beschriebene Aufbau weitgehend Verwendung. Die HF-Schleifen wurden nun gleichphasig gespeist und damit ein annähernd homogenes \tilde{B}_z erzeugt. Der axiale Strom wurde über Elektroden eingespeist. Es gelang so, an einem Screw-Pinch Plasma $T_e = T_o \approx 30$ eV, $n = 2 \cdot 10^{16}$, $\beta = 0,3$ eine Modulation ϵ bis zu 20 % bei $\omega_s \approx 5,5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ zu erzeugen. Durch stereoskopische Beobachtung des Plasmas in verschiedenen Abständen von der Mittelebene konnten die toroidale Driftbewegung ξ_T und die Bewegung der $m = 1$ Instabilität ξ_r voneinander isoliert und ihr zeitlicher Verlauf bestimmt werden (Abb.8). Abb. 8a zeigt deutlich die stabilisierende Wirkung des oszillierenden B_z -Feldes (Anwachsrate $\omega_i \approx 6 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$). Die Stabilisierung erfolgt wie früher am linearen Experiment unter der Bedingung: $\epsilon \cdot \omega_s > 2\omega_i$, d.h. für große Aspektverhältnisse werden offensichtlich keine wesentlichen toroidalen Effekte wirksam.

1) G.H.Wolf, G.Berge,; Phys.Rev.Lett. 22, 1096 (1969)

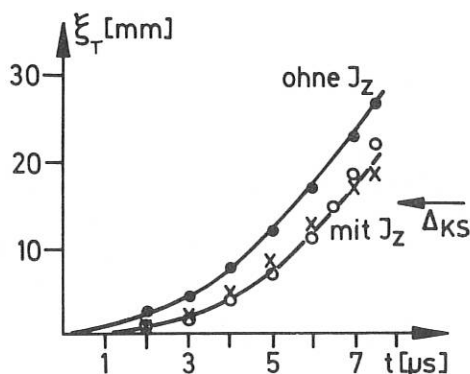
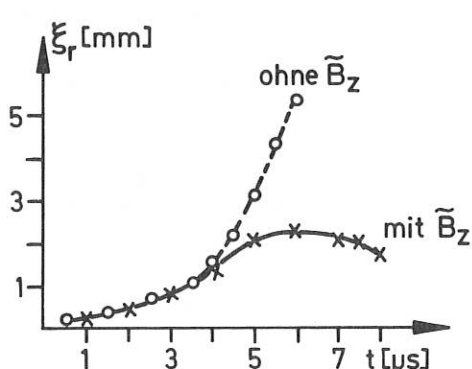


Abb.8a: Plasmaauslenkung durch $m = 1$ Instabilität mit u. ohne \tilde{B}_z -Stabilisierung Δ_{KS} -Berechnete Gleichgewichtslage.

Die toroidale Driftbewegung des Screw-Pinches wird dagegen durch die Stabilisierung nicht beeinflusst (Abb.8b). Wie zu erwarten, erfolgt beim Screw-Pinch die Torusdrift bereits in der Anfangsphase langsamer als beim θ -Pinch. Das Einschwingen in die Gleichgewichtslage, die für diese Plasmamparameter bei $\Delta = 1,5$ cm liegen sollte, kann nicht beobachtet werden. Die Frequenz der toroidalen Schwingungen ($\omega_T \sim 1/\sqrt{A}$) um die Gleichgewichtslage ist nämlich so klein, daß nur das erste Überschwingen in die Experimentierzeit fällt.

Mit diesem Experiment ist die Möglichkeit einer dynamischen Stabilisierung der gefährlichen $m = 1$ Instabilität auch an einem toroidalen Plasma demonstriert.

3.4 \tilde{B}_z - Stabilisierung und verwandte Probleme

Die bereits früher erwähnten Diskrepanzen zwischen Experiment und Theorie, wie sie bei der dynamischen Stabilisierung der $m = 1$ Mode am Screw-Pinch durch hochfrequente axiale Magnetfelder (\tilde{B}_z) bestehen, waren Gegenstand theoretischer Untersuchungen. Es wurden die Ursachen dafür, daß der dynamische Effekt im Experiment um mindestens eine Größenordnung über dem theoretisch vorhergesagten liegt, studiert. Allen theoretischen Arbeiten ist gemein, daß sie einzelne Moden untersuchen. Ansonsten aber sind sie Modellrechnungen mit sehr unterschiedlichen Voraussetzungen (z.B. scharfes oder diffuses Druckprofil). Daher sind die Diskrepanzen wohl eine Folge der Linearisierung des Gleichungssystems¹⁾, die ohne Beweis und nur wegen der mathematischen Vereinfachungen durchgeführt wurden. Eine nicht-lineare Theorie müßte auch die direkte Kopplung zwischen den Moden $m = 0$ und $m = 1$ über anharmonische Terme berücksichtigen, anstatt - wie die lineare Theorie - ausschließlich die Kopplung über die äußere treibende Kraft (indirekte Kopplung) zu berechnen. Durch eine Modellrechnung mit anharmonischen $m = 0$ und $m = 1$ Schwingungen eines Plasmaelementes kann diese Vorstellung gestützt werden. Einer der anharmonischen Kopplungsterme hat die Form der experimentellen dynamischen Kraft ($\sim \xi_0 \xi_1$) und ist genügend groß für dynamische Stabilisierung. Demnach würden bei der \tilde{B}_z -Methode die erzwungenen Zylinderschwingungen ($m = 0$) nur die Rolle eines zwischengeschalteten Oszillators spielen. Diese Methode kann durch Arbeiten an einer (parametrischen) Resonanzstelle sehr ökonomisch werden, wenn

1) G.Becker (wird veröffentlicht)

- 1) eine starke direkte Koppelung zwischen dem Resonator und der zu stabilisierenden Mode besteht,
- 2) die Dämpfung der Eigenschwingungen des Resonators genügend klein ist.

Dabei sind grundsätzlich nur solche Moden als Resonatoren geeignet, deren Resonanzfrequenzen genügend groß gegen die zu stabilisierende Anwachsrate sind. So ist es z.B. nicht möglich, die Eigenschwingungen (mit der Frequenz ω_t) um die Gleichgewichtslage eines toroidalen Screw-Pinches mit \tilde{B}_z resonant zu erregen und damit die $m = 1$ Mode zu stabilisieren. Es ist nämlich für größeres Aspektverhältnis $\frac{\omega_t}{\omega_{i \max}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a}{b} \ll 1$; wo $\omega_{i \max}$ die maximale Anwachsrate der $m = 1$, a der Plasmaradius und b der Spulenradius sind.

Bei der genannten Methode dient der HF Kreis hauptsächlich nur noch dazu, die Dämpfungsverluste des Resonators zu ersetzen. Der HF-Leistungsbedarf an einem Fusionsplasma würde stark von der Skalierung der Resonator-dämpfung mit der Temperatur abhängen. Aus diesem Grunde und im Hinblick auf die gleichzeitige Plasmaheizung wurde speziell die Dämpfung der $m = 0$ Eigenschwingungen eines Theta-Pinches untersucht.

3.5 Belt-Pinch mit rein poloidalem Magnetfeld

Nach Abschluß der Arbeiten über die dynamischen Methoden sollen Untersuchungen an toroidalen Belt-Pinch Plasmen aufgenommen werden. Im Unterschied zum Belt-Pinch I und II (s. Abschnitt 4) soll jedoch hier das Plasma lediglich von poloidalen Magnetfeldern eingeschlossen werden. Die vorgesehenen Arbeiten gründen auf früheren Ergebnissen am θ -Pinch mit antiparallelem, eingeschlossenem Feld, der ja dieselbe Grundkonfiguration hat (s. Jahresbericht 1971). Das Plasma wird in einem hohlzylindrischen Gefäß zwischen coaxial angeordneter Innen- und Außenspule erzeugt. Für die entstehenden Plasmahohlzylinder wird eine so große Schichtdicke erwartet, daß die Anwachszeit für die gefährlichen Tearing-Instabilitäten relativ groß wird ($\approx 20 \mu\text{sec}$). Es können dann auch Einstellvorgänge in das Gleichgewicht und evtl. auftretende, rasch anwachsende MHD-Instabilitäten studiert werden. Mögliche Gleichgewichte in dieser Konfiguration werden derzeit mit numerischen Rechnungen in einem idealisierten Modell untersucht (s. Abschnitt 8.5). Bei den vorgesehenen Spulendaten (Länge 75 cm, $R_1 = 8,25$ cm, $R_2 = 22$ cm) und bei Verwendung der Kondensatorbatterie ISAR III sind Plasmen mit einer Temperatur um 100 eV bei Dichten um 10^{16}cm^{-3} zu erwarten.

4. Belt-Pinch

(R.G.Bateman, H.Krause, M.Piller, R.Wilhelm, H.Zwicker)

4.1 Belt Pinch I

Der bisher beobachtete makroskopisch stabile Einschluß ($t \sim 100 \mu\text{sec}$) eines toroidalen Screw-Pinch Plasmas mit stark nichtkreisförmigem Plasmaquerschnitt (Belt-Pinch) war bei q -Werten von etwa $1,8 < q < 3,5$ erreicht worden.

Es wurde anschließend versucht, bei kleineren q -Werten zu arbeiten, um die Kruskal-grenze für den Belt-Pinch experimentell zu ermitteln.

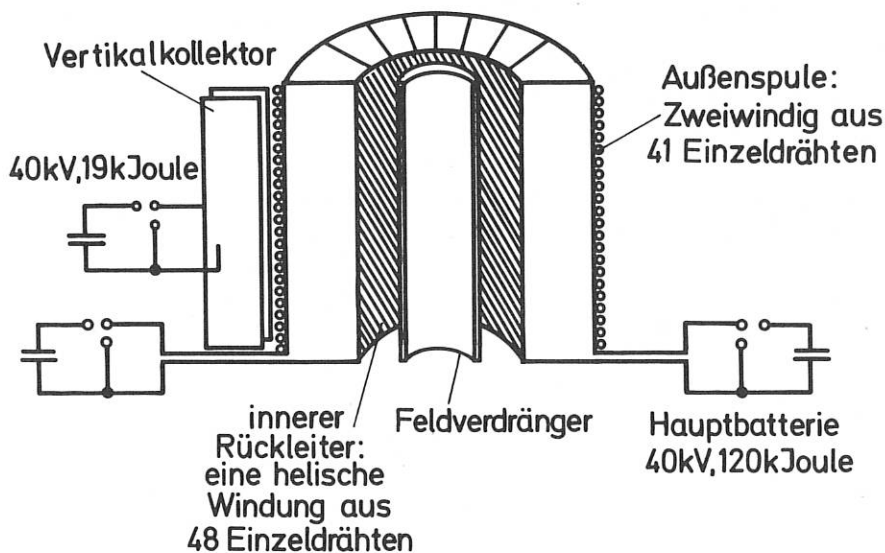


Abb. 9: Aufbau des Spulensystems

Hierzu wurde ein neues Spulensystem entworfen, wie es auch im neuen Belt-Pinch II Experiment vorgesehen ist (Abb.9). Es erlaubt, den externen toroidalen Strom auf der Innen- und Außenseite des Plasmagürtels weitgehend unabhängig vom poloidalen Strom zu variieren.

Das wurde dadurch erreicht, daß der Torusstrom auf der Außenseite der Spule jetzt durch eine eigene Kondensatorbatterie erzeugt wird, die zu beliebigen Zeitpunkten gezündet und gecrowbart werden kann. Auf der Innenseite wird die toroidale Stromkomponente durch eine helische Rückführung des Stromes der Hauptbatterie erzeugt. Durch Einführung von feldverdrängenden Metallzylindern in die Mittelöffnung des Torus kann hier die effektive toroidale Stromdichte auf die Hälfte gesenkt werden.

Die Einführung von Feldverdrängern aus Widerstandsmaterial, durch die eine Entdämpfung des Plasmastrom-Abfalls erreicht werden kann, ist geplant. Erste Messungen wurden zunächst nur mit 1/4 der Batterieenergie bei hohem Fülldruck (50 mTorr) durchgeführt. Unter der Annahme, daß der gesamte gemessene Plasmastrom in der sichtbaren Plasmasäule fließt, ergaben sich typische q -Werte, wie sie Abb. 10 zeigt. Bei diesen kleinen q -Werten zeigen side-on Aufnahmen nach etwa 30 μsec Deformationen des Plasmazylinders (Abb.11)

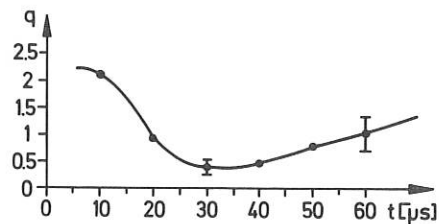


Abb.10: Zeitlicher Verlauf von q .

Für erste Temperatur- und Dichtemessungen wurde ein 90° -Laser-Streuexperiment aufgebaut. Unter den oben genannten Bedingungen zeigte die Elektronendichte nach etwa 25 μsec einen schnellen Abfall von $1,5 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ auf $4 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ und blieb anschließend für über 100 μsec konstant. Dieser Dichteabfall und die optisch erkennbaren Deformationen legen es nahe, daß man hier unter der Stabilitätsgrenze für den Band-Pinch liegt. Bei der verminderten Batterieenergie lagen die Temperaturen in der Einschlußphase mit etwa 6 eV wesentlich unter den Werten, die sich aus Abschätzungen mit dem Schneepflugmodell ergaben (20 - 30 eV). Untersuchungen am hoch- β Stellarator lassen darauf schließen, daß diese Diskrepanz auf mangelnde Vorionisierung zurückzuführen ist. Messungen ergaben einen Vorionisierungsgrad von $\leq 1\%$.

Es wurde deshalb eine neue, verbesserte Vorionisierungsbatterie gebaut, die mit doppelter Spannung (30 kV) bei doppelter Energie (10 kJ) arbeitet.

Mit dieser Vorionisierung werden die Untersuchungen bei hohen q -Werten mit voller Batterieenergie (120 kJ) fortgesetzt.

4.2 Belt-Pinch II

Bei den bisherigen Versuchen am 100 kJ Belt Pinch I ist die Lebensdauer des Plasmas für hohe q -Werte vermutlich nicht durch Instabilitäten, sondern durch Diffusionsprozesse wegen der niedrigen Temperaturen auf etwa 100 μsec begrenzt.

Um Stabilitäts- und Diffusionsuntersuchungen für $t > 100 \mu\text{sec}$ zu ermöglichen, ist der Übergang zu höheren Temperaturen und zu größeren Plasmadimensionen erforderlich.

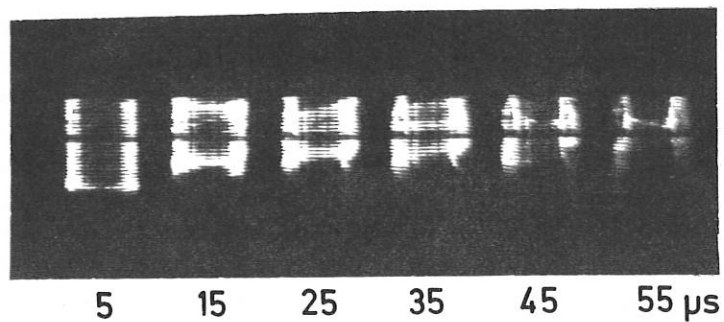


Abb.11: Side-on Momentaufnahmen am Belt-Pinch I bei kleinen q -Werten

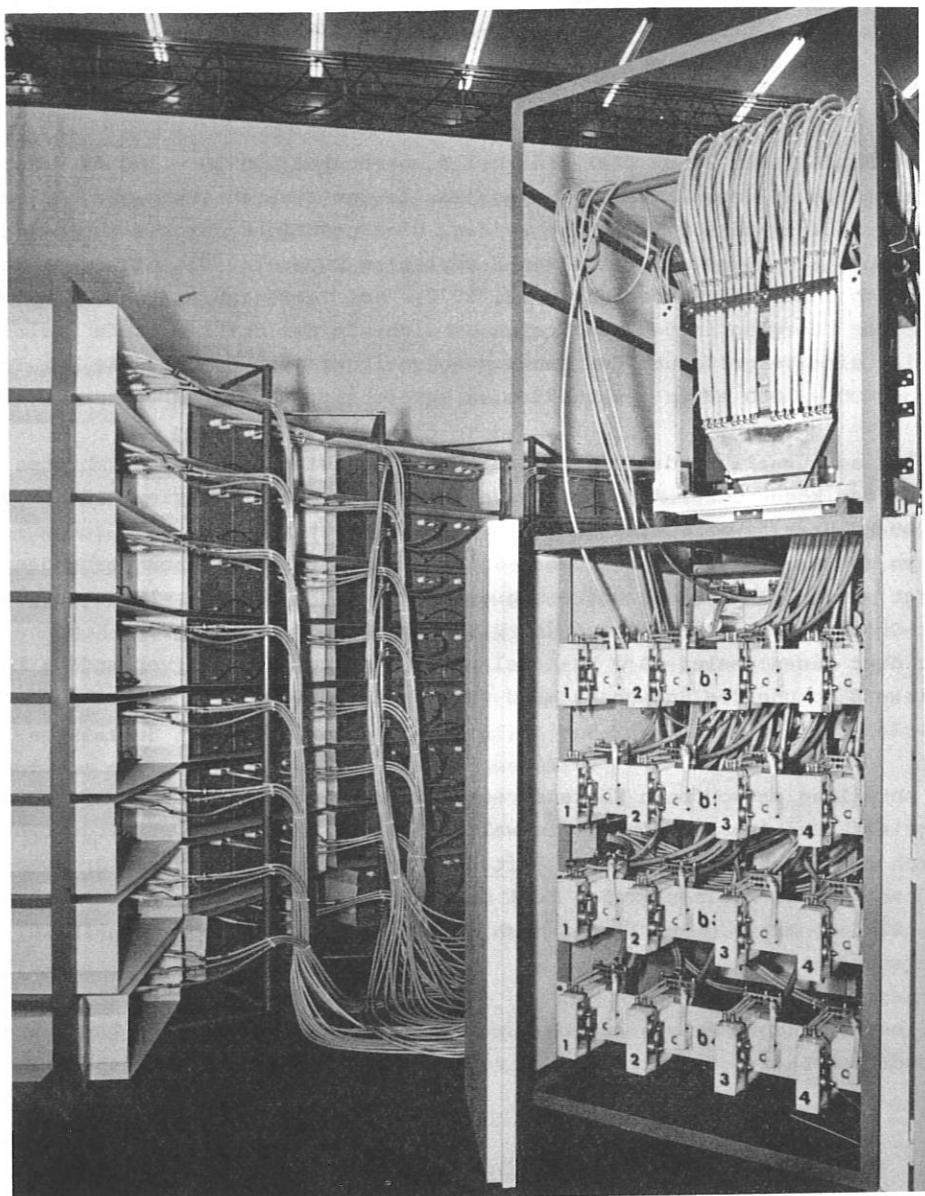


Abb.12: Ansicht eines 250 kW-Blocks sowie der dazugehörigen Start- und Crowbar-Funkenstrecken am Belt-Pinch II.

Hierzu wurde ein neues Experiment konzipiert (Belt-Pinch II), dessen Spulensystem etwa um einen Faktor 2,5 gegenüber Belt Pinch I linear vergrößert ist. Dies sollte eine Verlängerung der typischen Diffusionszeiten $\sim L^2$ erlauben. Zweitens wird der Übergang zu kleineren Fülldrücken und damit zu höheren Temperaturen ermöglicht, da für die implodierende Schicht größere Breiten zulässig werden.

Typische Daten der ersten Ausbaustufe des Experimentes sind:

Energieinhalt des Speichers :	0,8	MJ
Stoßspannung :	40	kV
Mittleres Magnetfeld :	7	kG
Anstiegszeit :	\approx 30	μ s
Plasmastrom :	\approx 500	kA
Pulsdauer (Abfallzeit des Feldes auf 70%) :	\approx 1	ms
Höhe der Spule :	260	cm
Außendurchmesser :	150	cm
Innendurchmesser :	60	cm

In der ersten Stufe (Belt-Pinch IIa) sind bei Temperaturen von 50 - 100 eV Untersuchungen im stoßdominierten Bereich vorgesehen. In der zweiten Stufe (Belt-Pinch IIb) soll die Stoßspannung auf 160 kV erhöht werden. Dies geschieht durch Einkoppelung eines Hochspannungsimpulses mit Hilfe von 8 variablen Drosseln, die mit Trafoblech gefüllt sind (vgl. Monatl. Mitteilungen 52, 1972). Bei Temperaturen von 200 - 500 eV beginnt hier der Übergang in den stoßfreien Bereich. In der dritten Stufe (Belt-Pinch IIc) ist eine Vergrößerung des Kondensatorspeichers vorgesehen, die bei Temperaturen von 400 - 1000 eV in den stoßfreien Bereich ($\lambda_{ii} >> 500$ cm) führen sollte.

Die Anlage ist so ausgelegt, daß die geplanten Ausbaustufen ohne große Umbauten realisiert werden können. Der Kondensatorspeicher ist in Form von vier Blöcken von (vorerst) 200 kJ über jeweils eine Schaltbox mit komplettem Start- und Crowbar-triggersystem sowie 32 Start- und Crowbar-Schaltern mit dem Kollektor verbunden. Abb. 12 zeigt einen 200 kJ-Block und einen geöffneten Schaltkasten. 16 gut zugängliche Start-Crowbar-Schalter sind auf dem Bild sichtbar. Jeder der 2 kJ-Kondensatoren ist über ein normales 60 Ω HF-Kabel mit den Funkenstrecken verbunden. Für eine Energieaufstockung des Speichers sind genügend Anschlußmöglichkeiten vorhanden.

Die in der Abteilung entworfenen Funkenstrecken wurden auf Einfachheit und robusten Aufbau ausgelegt. Bei Abbrand können die walzenförmigen Elektroden weitergedreht werden. Durch entsprechende Anordnung läuft der Funkenkanal während der Crowbarphase von über 1 ms über einen großen Teil der Oberfläche hinweg, was den Abbrand in Grenzen hält. Genauere Daten finden sich im Testbericht der Abt. Technik in diesem Jahresbericht.

Über 128 selbstgefertigte Pulsleitungen aus jeweils 4 Cu-Litzen mit großem Querschnitt (Quadrupol-Leitungen) wird der Stoßstrom in den Kollektor eingespeist.

Ein gesondertes Problem ergab sich für die Vorionisierung des Plasmas. Bedingt durch das große Plasmavolumen wird etwa 1 kJ Energie pro mTorr Fülldruck im Plasma benötigt. Es wurde eine Stoßbatterie von 60 kJ bei 18 kV zur Vorionisierung vorgesehen. Die Hälfte dieser Energie geht als Magnetfeldenergie in die Spule. Wie bereits am Belt-Pinch I erprobt, erfolgt der Anschluß der Vorionisierungsbatterie über eine koaxiale Drosselspule mit einer Vakuuminduktivität von ca. 400 nH. Durch Füllung mit 800 kg Ringbandkernen kann diese Drossel einen Fluß von etwa 0,8 Vs aufnehmen, sodaß die Stoßspannung des Hauptspeichers und damit ein Energieabfluß von diesem voll abgeblockt wird. Zugleich teilt die Drossel durch magnetische Sättigungseffekte die normalerweise sinusförmig schwingende Vorentladung in diskrete Stromimpulse von je 300 kA, von denen eine geeignet gewählte Anzahl zur Vorionisierung verwendet werden kann.

Die Konstruktionen des Experimentes wurden in Zusammenarbeit mit der Abteilung Technik Mitte des Jahres beendet. Ende des Jahres waren die wesentlichen Teile der Anordnung in Halle L 6 aufgebaut.

4.3 H.F. Vorionisierung

Die Methode dient als Zündhilfe für die eigentliche Vorionisierungsentladung bei kleinen Fülldrücken ($p_0 \leq 10$ mTorr). Sie soll am Belt-Pinch II eingesetzt werden. Ziel der Versuche war es, die Ionisationswirkung der HF unter dem Einfluß verschiedener Parameter zu studieren.

Variiert wurden:	Frequenz	(4,5 - 12,5 MHz)
	Amplitude	(5 - 16 kV)
	Fülldruck	(0,1 - 10 mTorr)

Die HF wurde kapazitiv an ein zylindrisches Entladungsgefäß angekoppelt. Als HF-Generator wurde eine Kondensatorentladung verwendet. Sie wird über einen nicht-linearen Ferrittransformator während eines Zeitintervalls von ca. 50 μ sec entdämpft. Die Elektronendichten wurden mit einem Mikrowelleninterferometer vom Michelsonstyp gemessen. Die Messungen zeigten, daß eine homogene Ionisierung erreicht wird (Abb.13). Im gesamten Druckbereich konnten Elektronendichten von $1 - 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ erzeugt werden. Die HF Amplitude hat oberhalb von $U_0 = 8$ kV keinen starken Einfluß auf diese Werte. Der Einfluß der Frequenz sowie der zeitliche Verlauf von n_e ist in Abb. 14 und 15 dargestellt.

4.4 Klassische Diffusionsmodelle für den Belt-Pinch

Durch die klassischen MHD-Gleichungen mit endlicher Leitfähigkeit wird die Teilchen- und Felddiffusion in Anordnungen untersucht, die den Garching Belt-Pinch approximieren. Die Berechnungen sind selbstkonsistent, und die Ergebnisse verdeutlichen das zeitabhängige Verhalten des Plasmas mit freiem Rand.

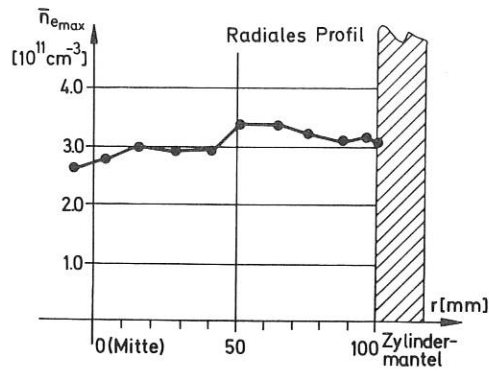


Abb.13: Radiale Verteilung von n_e .

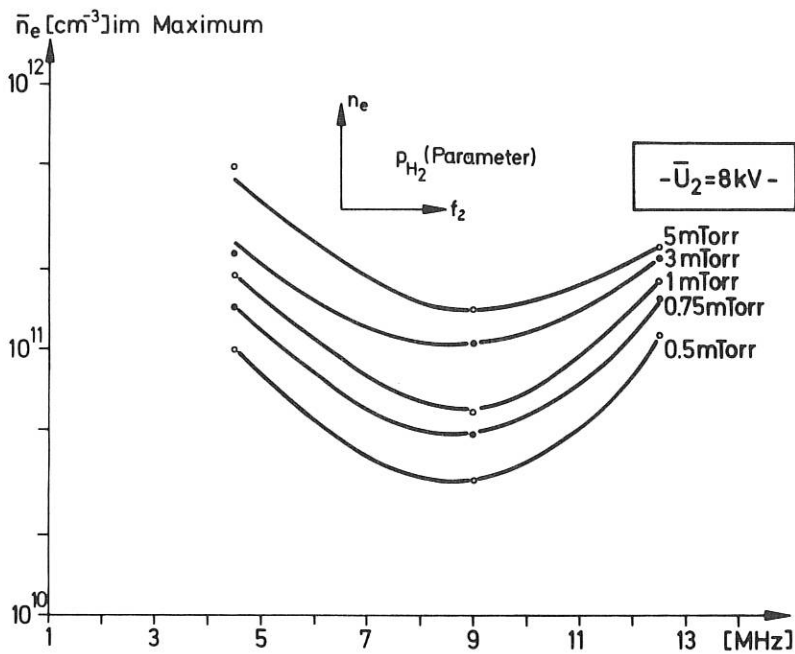


Abb.14: Frequenzabhängigkeit der Elektronendichte für verschiedene Füll-drucke.

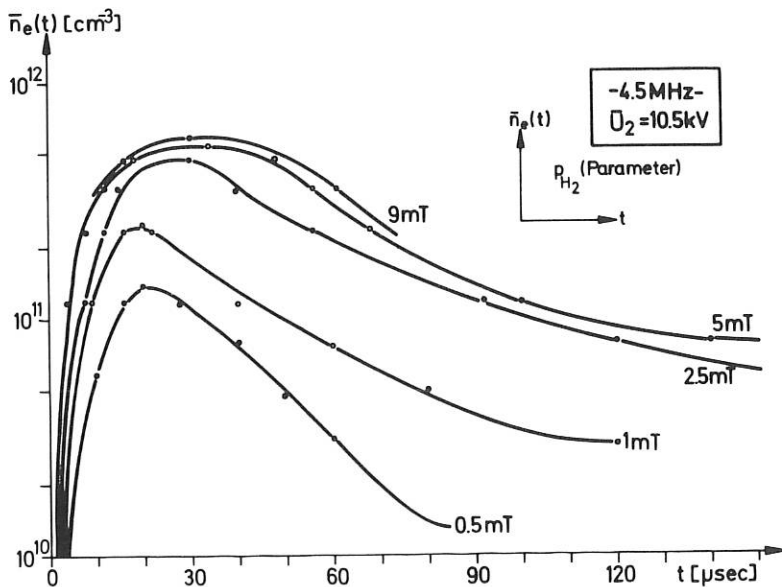


Abb.15: Zeitlicher Verlauf der Elektronendichte für verschiedene Drucke.

Es zeigt sich, daß die momentane Zeitskala der Diffusion sich mit der Ausbreitung des Plasmas sowie dem Feldabfall rasch ändert. Es treten nacheinander vier verschiedene physikalische Erscheinungen auf, die unter verschiedenen Bedingungen überwiegen können. Das poloidale elektrische Feld weist typisch einen anfänglichen kurzzeitigen Abfall auf. Anschließend treibt eine Spitzer-Diffusion einen Druckabfall an, der algebraisch in der Zeit verläuft, während das poloidale B-Feld mit einer langsameren exponentiellen Abfallrate verläuft. Die Pfirsch-Schlüter'sche Erhöhung des Druckabfalls überwiegt i.A. beim späteren Ablauf der Entladung, nachdem die Rotationstransformation merklich abgefallen ist. Schließlich kann in der Zwischenzeit der Pincheffekt die Diffusion aufheben.

Es wird ferner nachgewiesen, daß für das Belt-Pinch-Plasma unter geeigneten Bedingungen eine feste radiale Gleichgewichtslage besteht, die gegen eine durch den Abfall des poloidalen B-Feldes angetriebene Drift instabil ist.

5. Stoßwellenheizung dünner Plasmen - 500 kV-Theta-Pinch

(M.Keilhacker, M.Kornherr, F.Lindenberger, G.Maret, H.Niedermeyer, F.Söldner, K.-H.Steuer)

Die Experimente zur Untersuchung der Kompressionsheizung sehr dünner Plasmen ($n_{e0} < 10^{12} \text{cm}^{-3}$) wurden im Berichtsjahr abgeschlossen. Um die Untersuchungen auf höhere Dichten ausdehnen zu können, wurde eine Z-Pinch Vorionisierung entwickelt. Gleichzeitig wurden Planungen zum Umbau auf toroidale Geometrie abgeschlossen.

5.1 Kompressionsheizung bei sehr niedrigen Dichten

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf zwei Probleme: Die Plasmadynamik während der Kompressionsphase sowie die Heiz- und Verlustmechanismen. Dabei wurden im wesentlichen folgende Diagnostikmethoden angewandt: Magnetfeldmessungen mit einer Sonde hoher Orts- und Zeitauflösung, Streuung von Rubinlaserlicht und zeit-aufgelöste Neutronenmessung mit einem Szintillationszähler.

5.1.1 Plasmadynamik

Die Entwicklung des Magnetfeldprofils (die Abb.16 zeigt ein Beispiel) und das scharfe Einsetzen des Neutronenpulses (vgl. Jahresbericht 1971) ergeben das folgende Bild vom Kompressionsvorgang: Das Plasma wird in einer implodierenden Schicht aufgesammelt, deren Breite durch eine anomale Magnetfelddiffusion bestimmt ist. Der Neutronenimpuls setzt ein, wenn die Schicht die Achse erreicht. Die beobachtete Kompressionsgeschwindigkeit stimmt gut mit dem Schneepflugmodell überein. Ein Ablösen einer Stoßfront konnte im gesamten untersuchten Parameterbereich ($n_0 = 3 \cdot 10^{10} - 10^{12} \text{cm}^{-3}$, $U_0 = 150 - 480 \text{ kV}$) nicht beobachtet werden. Dieses Verhalten zeigt sich auch in numerischen Simulations-Rechnungen, wenn man einen genügend hohen Ohm'schen Widerstand ansetzt (s. Beitrag 8.2). Die experimentellen Ergebnisse führten zur Entwicklung eines stark vereinfachten Modells:

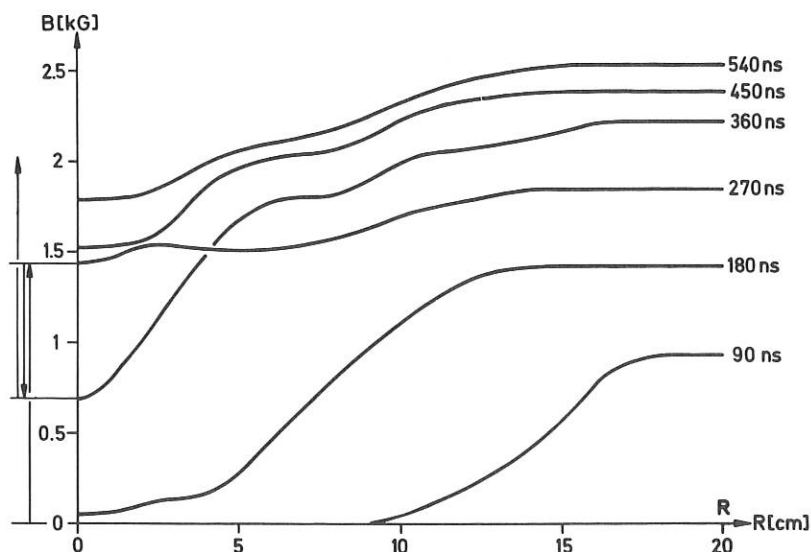


Abb.16: Magnetfeldprofile für Deuteriumplasma mit $n_{e0} = 7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $U_0 = 230 \text{ kV}$.
Das Verhalten des Magnetfeldes in der Nähe der Achse deutet auf eine starke Dynamik des komprimierten Plasmas hin.

Wir nehmen an, daß die Schichtdicke Δ durch die Skin-Formel gegeben ist

$$\Delta = \frac{c}{\omega_{pe}} (\nu t)^{1/2},$$

wobei ν die effektive Elektron-Ion Stoßfrequenz ist, die durch eine Mikroturbulenz bestimmt wird. Weiter nehmen wir an, daß ν proportional ω_{pi} ist

$$\nu = \alpha \cdot \omega_{pi}.$$

Die zur Kompression auf den halben Anfangsradius $R/2$ benötigte Zeit wird nach dem Schneeflugmodell berechnet.

Diese drei Beziehungen ergeben kombiniert die Schichtdicke bei der Kompression auf den halben Anfangsradius

$$\frac{\Delta R/2}{R} \sim (R^2 \pi B)^{-1/4} \cdot (R^2 \pi n_0)^{-1/8}.$$

Abb. 17 zeigt diesen Zusammenhang für $\alpha = 1$. Die dunkel eingezeichneten Balken geben den Bereich an, der bisher experimentell erfaßt werden konnte (linker Bereich: Turbulenzexperiment). Genauere Messungen führen zu einer Modifizierung des obigen Modells. Die Schichtdicke nimmt etwa linear mit der Zeit zu, was durch eine zeitlich anwachsende effektive Stoßfrequenz erklärt werden kann. Ob dieses ν_{eff} einen Sättigungswert erreicht, kann erst durch Experimente bei höheren Dichten geklärt werden. Die wichtige Frage, ob nach Erreichen einer bestimmten Schichtbreite die anomale Diffusion endet, kann an der gegenwärtigen Anlage nicht untersucht werden, da Endverluste eine hinreichend lange Beobachtung verhindern. Aus diesem Grunde ist ein Umbau des Experimentes auf toroidale Geometrie in Vorbereitung.

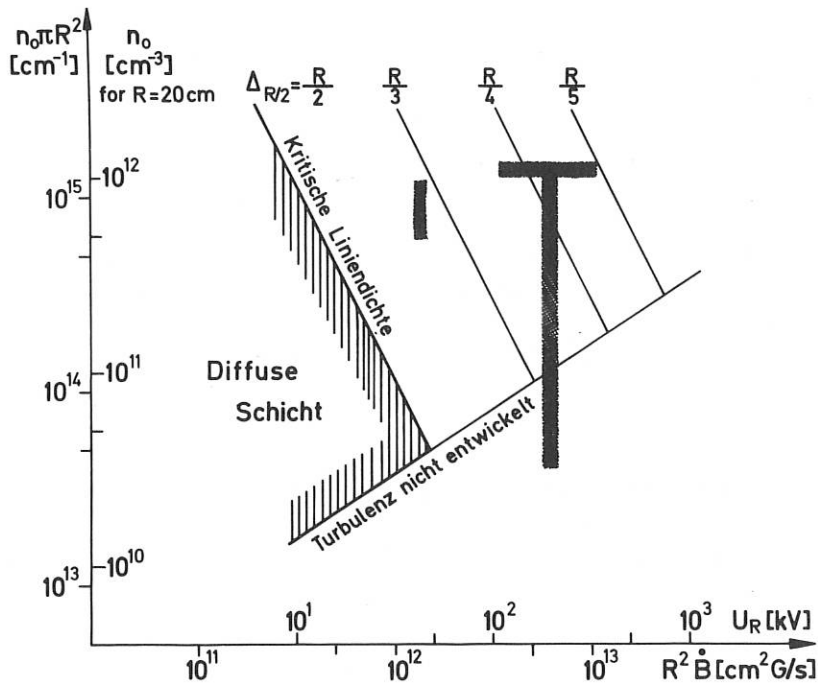


Abb.17: Erwartete Abhängigkeit der Schichtdicke am halben Anfangsradius $\Delta_{R/2}$ von Liniendichte $n_0 \pi R^2$ und Spulenspannung U_R . Der bisher experimentell erfaßte Bereich ist schraffiert gezeichnet.

5.1.2 Heiz- und Verlustmechanismen

Laser-Streumessungen und quantitative Neutronenmessungen ergaben bei einer Anfangsdichte von $1,3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ folgende Daten des komprimierten Plasmas:

$$n_e = 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}, T_e = 700 \text{ eV}, T_i = 15 \text{ keV}.$$

Während die Ionentemperatur mit der Schneepflug-Heizung zu erklären ist, bleibt die Elektronentemperatur weit unter dem Wert von 3 keV, der aufgrund der anomalen Widerstandsheizung ohne Verluste zu erwarten ist. Die gemessene Temperatur läßt sich durch axiale Wärmeleitung erklären, wenn man für die Elektron-Elektron-Stoßfrequenz den gleichen anomalen Wert annimmt, der sich für die Elektron-Ion-Stoßfront aus den Schichtdickemessungen ergibt. Dies weist darauf hin, daß für den anomalen Widerstand und die anomale Wärmeleitung ähnliche Prozesse verantwortlich sind.

5.2 Vorbereitung der Messung bei höheren Dichten

Die Untersuchungen sollen auf Plasmen höherer Dichte ($n_{e0} = 10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) ausgedehnt werden, da dieser Dichtebereich von besonderer Bedeutung für eine Anwendung im Fusionsreaktor ist. Deshalb wurde eine Z-Pinch Vorionisierung entwickelt, die bei 1 mTorr Fülldruck ein hochionisiertes Plasma erzeugt. Die

Entladung wird aus einem 120 kV-Marx-Generator mit 6 kJ Energieinhalt gespeist. Die Zündung wird durch einen Gleitfunken auf der Kathodenseite erleichtert. Mikrowellen-Interferometrie und eine neuartige Laserstremethode (Messung der radialen Dichteverteilung bei einer Entladung) bewiesen die Brauchbarkeit der Vorionisierung.

5.3 Umbau auf toroidale Geometrie

Um während der Kompressionsphase Einflüsse durch Wärmeleitung ausschließen und das stationäre Plasma nach der Kompression untersuchen zu können, ist ein Umbau der Spule auf toroidale Geometrie (Belt-Pinch) in Vorbereitung. An die Abteilung Technik wurde ein Konstruktionsauftrag für die Belt-Pinch Spule mit Kollektor vergeben.

Daten des Belt-Pinch Experimentes: Spulenhöhe 120 cm, äußerer Durchmesser 85 cm, innerer Durchmesser 40 cm, zweifache Einspeisung (250 kV Umfangs-Ladespannung). Erwartete Crowbar-Abfallzeit 50 μ s. Erwartete Iontemperatur 2 bis 3 keV bei Enddichten von 10^{14} cm^{-3} . Technische Details siehe Bericht der Abt. Technik.

6. Meßmethoden an heißen Plasmen

6.1 Laserdiagnostik

(W.Braun, A.Därr, G.Decker, L.Kellerer, H.Röhr)

Mit Rubinlaserlicht wurden Streumessungen am 500 kV-Experiment (Maret, Söldner, s. 5.1), an ISAR II (Sommer, Engelhardt, s. 2.) und am Belt-Pinch (Krause, s.4.) durchgeführt.

Der Schwerpunkt der Gruppe Laserdiagnostik lag auch 1972 auf der Entwicklung und Beherrschung der 10 μ m-Technik:

Zur Interferometerbeleuchtung konnte ein widerstandsentkoppelter TEA-Laser bereitgestellt werden, dessen Impulsdauer durch Wahl geeigneter Gasgemische zwischen 5 und 10 μ s liegt. Mit einer Drehspiegelkamera konnten von Modellplasmen entsprechende Schmierbilder hergestellt werden.

Ebenfalls für längere Beobachtungszeit wurde ein TEA-Laser entwickelt, der es gestattet, zwei Impulse in variablem Abstand von 1 - 10 μ s zu erzeugen.

(G.Decker, A.Därr, H.Röhr)

Für Streuexperimente bei 10 μ m wurde ein Hochleistungs-CO₂-Laser entwickelt, der pro Impuls 30 - 40 J bei einer Spitzenleistung von ca. 30 MW emittiert. Der Laser hat einen Querschnitt von ca. 50 x 50 mm². In die Anode sind, von Quarzröhrchen umgeben, Drähte eingebettet, die zur Vorionisierung dienen. Die Vorionisierungsspannung wird nicht durch einen getrennten Kreis, sondern durch eine besonders programmierte Entladung erzeugt. Um reproduzierbar arbeiten zu können, muß das

Gasgemisch durch den Laser hindurchströmen. Der Querschnitt des Laserstrahls beträgt ca. $40 \times 40 \text{ mm}^2$ bei einer Divergenz von ca. 10 mrad . Ein detaillierter Laborbericht ist in Vorbereitung.

(G.Decker, L.Kellerer, H.Röhr)

Die Streumessung am Turbulenzexperiment ($10,6 \text{ }\mu\text{m}$, $4,5^\circ$ -Vorwärtsstreuung) konnte noch nicht abgeschlossen werden. Die Interpretation der Meßsignale ist noch nicht klar:

Gleichzeitige Beobachtung von Fluktuationen mit k -Vektoren parallel und senkrecht zur Elektronendrift ergab keine Korrelation zwischen den Signalen. Licht mit vergleichbarer Intensität konnte auch manchmal in der 3. Halbwelle der Entladung beobachtet werden, wo nicht mehr mit stoßfreien Stoßwellen zu rechnen ist. Um Klarheit über die Natur des beobachteten Lichtes zu erhalten, wurden Fabry-Perot-Interferometer eingesetzt, jedoch liegen z.Z. aus technischen Gründen noch keine endgültigen Ergebnisse vor. Im Zusammenhang mit dem Nachweis von Streulicht wurden mehrere Detektoren untersucht. Es konnte bestätigt werden, daß Kristalle aus quecksilberdotiertem Germanium der Fa. Sante Barbara Anstiegszeiten $\leq 1,5 \text{ ns}$ haben. Damit sind diese Detektoren auch für sog. Homodyne-Verfahren geeignet, bei denen Differenzfrequenzen $< 500 \text{ MHz}$ erwartet werden.

Zur Kühlung der Detektoren wurden anstelle flüssigen Heliums erfolgreich Kleinst-Kühlgeräte eingesetzt, was bei komplexen Experimentieraufbauten eine bedeutende Arbeitserleichterung ist.

(G.Decker, L.Kellerer, H.Röhr)

Um am toroidalen Hoch- β Stellarator ISAR T 1 Messungen des Elektronendichteprofiles durchführen zu können, ohne an das Entladungsgefäß Fenster anbringen zu müssen, wurde für die holografische Interferometrie ein Fluor-Wasserstofflaser gebaut. Er emittiert Impulse von ca. 50 MW während ca. 200 ns bei im wesentlichen 6 Wellenlängen zwischen $2,7$ und $3,2 \text{ }\mu\text{m}$, für die das Quarzgefäß des Plasmas transparent ist. Es wurde gefunden, daß als Flächendetektoren mit Gelatine beschichtete Glasplättchen zwar an örtlicher Auflösung und Empfindlichkeit von den bereits bekannten dünnen Metallschichten (Wismut, Kadmium) übertroffen werden, daß jedoch hinsichtlich der Linearität bezüglich der Intensität der Gelatine-Detektor die besten Ergebnisse bringt. Deshalb konnten bei der Aufnahme von Quarzkeilhologrammen im Doppelbelichtungsverfahren alle 6 Laserlinien des HF-Lasers verwendet werden. Die Reproduktion einer Aufnahme mit einem He-Ne-Laser und Zylinderoptik ergab sechs gut auswertbare Interferenzbilder.

(W.Braun)

6.2 Polarmetrie an Plasmen

(E.Glock)

Experimentelle Arbeiten konnten keine durchgeführt werden.

Im Anschluß an frühere Arbeiten wurde die Beeinträchtigung der Meßgenauigkeit bei

Messungen "von Schuß zu Schuß" sowie die Möglichkeit von Polarisationsmessung mittels Fluktuationskorrelation untersucht.

7. Numerische Auswertung

(R.Wunderlich)

Das Datenerfassungssystem "DELTA 70" gestattet neben der Digitalisierung von Oscillogrammen (graphischer Input) auch die Ausgabe von Daten auf den Bildschirm (graphischer Output). So lag es nahe, durch Anbau einer Filmkamera sowie einer Steuerung für den Verschuß das System soweit zu vervollständigen, daß voll-automatisch Schmalfilme aufgenommen werden können. Diese Zusätze wurden im Berichtsjahr erstellt und erfolgreich erprobt. In Zusammenarbeit mit Herrn R.Chodura (s. Abschnitt 8.1) wurde ein Schmalfilm "Anomaler Widerstand eines Stromes senkrecht zu einem konstanten Magnetfeld" gedreht.

Die Schar der Standard-Unterprogramme wurde erneut vergrößert, insbesondere kamen weitere Plotprogramme hinzu. Weiterhin wurden im Zuge der Auswertung von Messungen der verschiedenen experimentellen Gruppen einige neue Auswerteprogramme erstellt.

In Zusammenarbeit mit Herrn W.Köppendörfer (s. Abschnitt 2) wurden die spektroskopischen Rechnungen weitergeführt und Besetzungsdichten und Übergänge für die heliumähnlichen Ionen CV bis NE IX berechnet.

8. Theoretische Arbeiten

8.1 Anomaler Widerstand in einem turbulenten Plasma

(R.Chodura, D.Biskamp)

A) Strom senkrecht zum Magnetfeld

Mit Hilfe numerischer Simulationsexperimente wurde die Frage untersucht, wie die Anwesenheit eines stationären, homogenen Magnetfeldes den Instabilitäts-Mechanismus, die Turbulenzeigenschaften und den anomalen Widerstand in einem stromführenden Plasma beeinflusst. Diese Frage ist insbesondere für die Erklärung von Experimenten an stoßfreien Stoßwellen von Bedeutung.

Die von D.Forslund, R.Morse und C.Nielson gefundene Elektron-Zyklotron-Drift-Instabilität wurde in eindimensionalen Systemen hinsichtlich ihrer Startbedingung, nichtlinearen Entwicklung und Sättigung untersucht. Dabei wurde gefunden, daß die Elektronentemperatur quadratisch mit der Zeit zunimmt, solange bis die Ionenschallgeschwindigkeit im Plasma $\sqrt{T_e/m}$; etwa gleich der halben Driftgeschwindigkeit wird. Dann schaltet die Instabilität ziemlich abrupt aus und der anomale Widerstand fällt stark ab.

Zweidimensionale Simulationsexperimente in der Ebene senkrecht zum Magnetfeld zeigten dagegen ein gänzlich anderes Verhalten: Fluktuationsenergie der Instabilität und anomaler Widerstand durchlaufen ein flaches Maximum lange bevor die Ionenschallgeschwindigkeit vergleichbar groß wie die Driftgeschwindigkeit geworden ist. Das Maximum des Widerstandes erwies sich als nahezu unabhängig vom Magnetfeld und der Ionenmasse. Der Instabilitätsmechanismus ist in diesen Fällen offenbar die Ionenschallinstabilität, die nur indirekt über die Isotropisierung der Elektronen vom Magnetfeld abhängt. Das zeitasymptotische Verhalten des Abfalls der Instabilität wird derzeit noch untersucht.

B) Strom parallel zum Magnetfeld

Für den Fall $\omega_{ce} > \omega_{pe}$ wurde keine Instabilität gefunden, die anstelle der in diesem Fall ineffektiven Ionenschallinstabilität den Strom begrenzt.

8.2 Ionenheizung in stoßfreien Stoßwellen

(R.Chodura, B.Röthlein)

Es wurde ein numerisches Modell entwickelt, in dem die Elektronenkomponente als Flüssigkeit mit endlicher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit, die Ionenkomponente durch eine Anzahl repräsentierender Teilchen (PIC-Methode) behandelt wird. Mit Hilfe dieses Modells ist es möglich, die Dynamik in Stoßwellen hoher Machzahl zu studieren, in denen die anströmenden Ionen teilweise von der Stoßwelle durchgelassen, teilweise reflektiert werden ("überkritische Stoßwellen").

Die numerischen Rechnungen zeigen, daß die Ionenreflexion bereits bei ziemlich niedrigen Machzahlen ($M \sim 2$) einsetzt aber auch bei $M \approx 5$ immer noch nur wenige Prozent der auf die Stoßwelle treffenden Ionenstromdichte erfaßt. Der Potentialsprung in der Stoßfront beträgt für große Machzahlen zwar nur etwa 0.8 der kinetischen Energie der ausströmenden Ionen, aber die Aufheizung der Ionen in der Stoßfront verbreitert die Geschwindigkeitsverteilung der Ionen derart, daß trotzdem einige Ionen reflektiert werden können.

Weitere Untersuchungen gelten der Thermalisierung der Ionen bei mehrfacher Reflexion am Kompressionskolben in Fällen extrem hoher Machzahl einer Kompression ohne magnetisches Vorfeld.

8.3 2 D (r, z, t) MHD-Code

(W.Schneider)

Die Ergebnisse der Rechnungen wurden für eine Diskussion der Energiebilanz am Theta-Pinch verwendet /91/.

Das Programm diente als Grundlage für eine Diskussion des geraden Theta-Pinches als möglichem Fusionsreaktor (ohne Berücksichtigung wirtschaftlicher Überlegungen).

Dazu wurden neben der Kompressionsheizung als weitere Heizeffekte α -Teilchenheizung und Laserheizung (inverse Bremsstrahlung) aufgenommen. Außerdem wurde ein Reibungsterm eingeführt, der die Verzögerung des Ausströmens des Plasmas bei einer Modulation des äußeren Magnetfeldes beschreibt /163/.

8.4 1 D MHD - Programmgenerator

(W.Schneider, D.Düchs)

Für Systeme gekoppelter, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen bis zur 2. Ordnung werden Differenzenschemata entwickelt. Es hat sich als wesentlich erwiesen, von einer integrierten Form der Gleichungen auszugehen und nur den Verlauf der Funktionen selbst, nicht deren Produkte linear zu interpolieren. Durch Diskretisierung des Differentialgleichungs-Systems wird selbsttätig ein algebraisches Gleichungssystem konstruiert und gelöst.

Dafür wurde ein Programmgenerator entwickelt, der für vorgegebene Differentialgleichungen ein FORTRAN-Programm liefert. Der Generator ist zur Zeit anwendbar auf Gleichungen, die keine Produkte von Ableitungen enthalten.

8.5 Bestimmung toroidaler Gleichgewichte in einem Modell diskreter Leiter

(W.Ochem)

Das Modell besteht aus einem System coaxialer, axialsymmetrischer, idealer Einzelleiter. Ein Teil führt die Ströme der Innenspule, ein anderer die der Außenspule. Dazwischen liegen die Leiter, die den Strom auf der Plasmaoberfläche simulieren. Das Innere des Plasmas ist stromfrei.

Die Spulenströme sind zum Teil expliziert und zum Teil durch lineare Beziehungen über den eingeschlossenen Fluß gegeben. Die Plasmaströme sind Induktionsströme. Die Ströme in den einzelnen Leitern und die Flüsse durch die Leiterringe sind durch ein lineares Gleichungssystem miteinander verbunden.

$$\vec{\Psi} = M \vec{I} \quad (1)$$

Die Elemente von M sind die Induktivitäten des Systems.

Die Bedingungen dafür, daß sich die Plasmaoberfläche im Gleichgewicht befindet, lauten

$$\begin{aligned} \Psi &= \text{const} \\ j_p &= \text{const} \end{aligned} \quad (2)$$

Das Gleichungssystem (1) mit den Zusatzbedingungen (2) wurde numerisch nach den Ortskoordinaten der die Plasmaoberfläche darstellenden Leiter gelöst (unter Einschränkungen, die schrittweise abgebaut werden).

Erste Rechnungen wurden durchgeführt, um die Abhängigkeit des Verhältnisses α von Plasmalänge zu Plasmadicke im Gleichgewichtszustand zu untersuchen, wenn die Stromverteilung in den Spulen, die Geometrie der Spulen und die relative Lage des Plasmas zu den Spulen geändert wird.

Sei der Unterschied der Spulenradien ΔR und deren Länge L , dann erhält man hier Plasmen der Dicke $\frac{\Delta R}{2}$ und für $\frac{L}{\Delta R} = 5$ ein $\alpha > 2$ wenn die Innen- und Außenspule getrennte Flußflächen sind. Die Geometrie der Spulen geht in diesem Fall nicht stark in α ein. α wird groß (> 4), wenn das Plasma nahe einer Spule liegt.

8.6 Belt-Pinch Stabilität

(W.Grossmann)

Die Stabilität des toroidalen Belt-Pinches gegen Kink-Moden wurde mit Hilfe eines unendlich langen zylindrischen Modells untersucht. Kink-Moden entsprechen radialen Verschiebungen, höhere "m" Nummer elliptischen u.a. Verformungen ohne Verschiebung der gesamten Plasmasäule. Ein $\beta = 1$ Oberflächenstrom-Modell liefert eine analytische Dispersionsgleichung, deren numerische Lösung mit realistischen Belt-Pinch Plasmaparametern sehr kurzweilige, schnell anwachsende Instabilitäten voraussagt. Diese Instabilitäten sind bisher in dem jetzigen Experiment nicht beobachtet worden. Numerische Rechnungen mit einem diffuse-profil-Modell zeigen, daß die Anwachsrate kleiner als die für scharfe Oberflächen, aber trotzdem beobachtbar werden sollten. Die Rechnungen werden für verschiedene Formen der toroidalen Stromverteilung fortgesetzt. Man glaubt, aus Erfahrung mit Rechnungen in linearer Anordnung¹⁾, daß die toroidale Stromverteilung eine wesentliche Rolle für die Stabilität spielt.

8.7 Das Spektrum idealer MHD-Plasmen

(W.Grossmann, J.A.Tataronis)

Das Studium des Spektrums eines idealen MHD-Plasmas, welches im vorigen Jahr begonnen wurde²⁾, wurde fortgesetzt. Im Gegensatz zur früheren Arbeit, wo hauptsächlich das diskrete Spektrum betrachtet wurde, ist das kontinuierliche Spektrum untersucht worden. Es wurde gezeigt, daß die Eigenfunktionen der Strömung im kontinuierlichen Spektrum singular sind. Um das Verhalten einer Störung bei vorgegebener Anfangsbedingung oder äußerer treibender Quelle zu untersuchen, ist eine korrekte Behandlung des Anfangswertes oder Randwertproblems notwendig/IPP 1/127, B 5/.

1) IPP Jahresbericht 1971

2) IPP Jahresbericht 1971, S. 164

Die Anwendung dieser Theorie auf Plasmen mit starken Magnetfeld- und Dichtegradienten (z.B. Theta, Z-Screw-Pinch) führte zu dem wichtigen Ergebnis, daß das linearisierte MHD-Gleichungssystem räumliche Landau-Dämpfung vorhersagt. Diese Dämpfung wird durch Phasenmischung verursacht. Verantwortlich für die Phasenmischung ist die Tatsache, daß alle charakteristischen Wellengeschwindigkeiten sehr stark mit dem Plasmaradius variieren.

Eine mit Rücksicht auf die obenerwähnte Betrachtung ausgeführte Nachprüfung der Wellenausbreitung in der einfachen θ -Pinch Geometrie hat zur Erklärung einiger bisher nichtverstandener experimenteller Ergebnisse geführt. Zum Beispiel wird das experimentelle Ergebnis, daß die Dämpfung von torsionalen Alfvénwellen¹⁾, /IPP 1/127, C 4/ sehr viel schneller erfolgt als man auf Grund von nur klassischen dissipativen Prozessen erwarten würde, durch Anwendung der neuen Theorie erklärbar. Es wurde weiter gezeigt, /IPP 1/127, B 6/, daß Bedingungen für die Kopplung einer äußeren treibenden Quelle zur Erzeugung von Wellen gefunden werden können, die sich in einer diffusen Plasmasäule ausbreiten.

Theoretische Rechnungen über die Effektivität der gefundenen MHD-Plasmawellendämpfung (Phasenmischung) für Plasmaheizung sind im Gange.

8.8 Gleichgewicht und Stabilität axialsymmetrischer toroidaler Plasmakonfigurationen

(F.Herrnegger, W.Ochem)

Die derzeit vorgeschlagenen und durchgeführten axialsymmetrischen Hoch-Beta Plasma-Einschluß-Experimente sind dadurch charakterisiert, daß das Aspekt-Verhältnis in der Größenordnung von eins ist (nicht groß), sodaß die übliche Entwicklung der MHD-Gleichgewichtslösungen nach dem inversen Aspekt-Verhältnis möglicherweise nicht geeignet sind, um Einschluß- und Stabilitätsverhalten der Plasma-Konfiguration zu studieren. Daher sind exakte MHD-Gleichgewichte als Modellfall für Stabilitätsuntersuchungen nützlich. Es wurde eine ganze Klasse axialsymmetrischer MHD-Gleichgewichte angegeben, die dadurch charakterisiert sind, daß poloidale und toroidale Ströme fließen und der Querschnitt der Plasmasäule elliptisch und dreieckig verformt ist²⁾ /IPP 1/127, F 2/. Geeignete Überlagerung mehrerer Partikulärlösungen gestattet es, verschiedene Stromdichteverteilungen zu beschreiben. Die Stabilität spezieller Lösungen bezüglich des lokalen, notwendigen Stabilitätskriteriums von Mercier wurde in der Nähe der magnetischen Achse untersucht. Es zeigt sich, daß Lösungen mit glockenförmiger toroidaler Stromdichteverteilung für axial-elongierte Plasmaquerschnitte instabil sind, daß jedoch die Überlagerung einer weiteren Partikulärlösung, die eine günstige Dreiecksverformung des Plasmaquerschnittes verursacht das lokale Mercier-Kriterium, notwendig für Stabilität, erfüllt³⁾. Bei spezieller Wahl der Gleichgewichtsparameter erhält man die Bedingung, daß die Rotationstransformation auf der magnetischen Achse kleiner als 1.3 sein muß, $1/2\pi < 1.3$. Dieser kritische Wert kann bei anderer Parameterwahl größer gemacht werden.

1) W.Grossmann, M.Kaufmann, J.Neuhauser "Damping of Alfvén and Magnetoacoustic Waves at High-Beta", submitted to Nuclear Fusion

2) F.Herrnegger, "On the Equilibrium and Stability of the Belt Pinch", V.Europ.Conf.on Contr. Fusion and Plasma Phys., Vol.1, 26 (1972)

3) F.Herrnegger, E.K.Maschke, "Stability of Exact Toroidal MHD Equilibria with Noncircular Cross Section" (to be published)

Weiters wurde eine Klasse toroidaler $\ell = 0,1$ Hoch-Beta Stellarator-Gleichgewichte, entwickelt nach einem kleinen Parameter, untersucht /IPP 1/127, B 2/ (cf. Nührenberg).

Experimentelle Plasmaphysik 2

Abt. Dir. Dr. Grieger

STATIONÄRE ODER QUASI-STATIONÄRE PLASMEN IN TOROIDALER KONFIGURATIONEinleitung

Im Rahmen des Programms der Abteilung Experimentelle Plasmaphysik 2 werden hauptsächlich solche toroidalen Magnetfeldkonfigurationen untersucht, die grundsätzlich zur stationären Einschließung von Plasmen geeignet sind. Diese unterliegen der Einschränkung, daß sie entweder

- aus einer nicht-rotationssymmetrischen Feldanordnung bestehen (Stellarator), deren magnetische Oberflächen z.B. annähernd elliptischen Querschnitt haben, oder
- nur durch die Einbringung ringförmiger elektrischer Leiter in das vom Plasma umhüllte Volumen erzeugt werden können (Levitron, Multipole).

Während die Verwirklichung eines stationär betriebenen Fusionsreaktors nach dem Stellaratorprinzip denkbar ist, wird die Anwesenheit innerer Leiter für diesen Zweck als eine unüberwindbare Schwierigkeit betrachtet. Das Studium von Plasmen in den übersichtlichen und theoretisch vorteilhaften Multipol-Konfigurationen dient darum dem grundsätzlichen Verständnis der den Plasmaeinschluß bestimmenden Mechanismen; es soll die umfangreichen Untersuchungen an den Stellaratoren mit ihren komplizierten Magnetfeldern ergänzen und stützen.

Im folgenden ist eine einleitende Zusammenfassung der größeren Experimente der Abteilung 2 gegeben.

Wendelstein W VI, eine Anlage mit Quadrupol-Konfiguration, befand sich im Stadium der Entwicklung wesentlicher technischer Komponenten, insbesondere ihrer beiden Innenringe. Diese sind mit Supraleitern ausgerüstet, um ihr langzeitiges Schweben zu ermöglichen. Auf diese Weise kann vermieden werden, daß störende Zuleitungen oder Aufhängungen das von Plasma ausgefüllte Volumen durchqueren.

Der seit mehreren Jahren mit Barium-Plasmen betriebene Stellarator Wendelstein W II a wurde umgebaut, um daran Versuche zur Plasma-Heizung mit TTMP (Transit Time Magnetic Pumping) durchführen zu können. Diese Versuche stehen im Rahmen einer mit CEA-Grenoble und der Ecole-Royale-Militaire, Brüssel, vereinbarten Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Hochfrequenz-Plasmaheizung. Teil dieses Programms waren auch die Vorarbeiten zur Errichtung eines gegenüber der W II-Generation vergrößerten und speziell für Heizexperimente konzipierten Stellarators WEGA, der später in Grenoble gemeinsam mit dem dort in Vorbereitung befindlichen Tokamak PETULA betrieben werden soll. Soweit möglich, stimmen diese beiden Apparaturen in den wesentlichen Parametern überein.

Die Experimente zur Ohm'schen Heizung von Wasserstoffplasmen im Stellarator W II b, der in den wesentlichen Abmessungen und Eigenschaften mit W II a übereinstimmt, konnten erfolgreich fortgeführt werden. Es gelang, die Entladung auf einige Millisekunden auszudehnen und damit einen angestrebten quasistationären Zustand (Hauptheizphase) zu erzeugen. Dies schafft eine Ausgangssituation für Aussagen über Energie und Teilchen-Einschließung.

Bezüglich des geplanten Stellarators W VII wurde die Zusammenarbeit mit anderen Abteilungen des IPP derart vertieft, daß die Berichterstattung darüber außerhalb der Berichte der einzelnen Abteilungen gegeben wird, um so eine geschlossene Darstellung zu ermöglichen.

1. STELLARATOR W II a

1.1 Umbau der Anordnung

Wissenschaftl. Mitarbeiter: W. Ohlendorf, H. Pacher; Techn. Mitarbeiter: D. Köhler

Der Umbau des Stellarators Wendelstein W II a konnte im Berichtsjahr erfolgreich beendet werden, allerdings mit großer Verzögerung gegenüber dem laut Netzplan erwarteten Termin. Die Ursache hierfür waren die neuen Brücken für die helikalen Leiter, die den extremen Anforderungen erst nach mehrfachen Verbesserungen der Kontakt-Flächen und der Kontakte zu den Leitern selbst standhielten.

Auch der Bau des TTMP-Generators stieß auf unerwartete Schwierigkeiten, sodaß auch hier der geschätzte Termin nicht eingehalten werden konnte. Die Experimente mit Barium-Plasma und TTMP konnten daher erst Anfang November gestartet werden.

1.2 Ionen-Heizung durch Transit-Time-Magnetic-Pumping (TTMP)

Wissenschaftl. Mitarbeiter: P. Javel, W. Ohlendorf, H. Pacher, J.-G. Wegrowe;
Techn. Mitarbeiter: G. Abele, H. Holitzner, D. Köhler, U. Weber

Die Grundzüge des Experiments zur Heizung von Ba-Plasma mittels TTMP im Stellarator Wendelstein W II a wurden im Jahresbericht 1971 beschrieben. Da sich die Inbetriebnahme des Experiments verzögerte (siehe oben) liegen z.Zt. nur vorläufige Ergebnisse vor, die in sehr begrenzter Meßzeit gewonnen wurden. Die bisher eingesetzten Diagnostiken waren der Teilchendetektor (siehe Jahresbericht 1971), der gleichzeitig als Limiter diente und die Resonanzfluoreszenz als spektroskopisches Verfahren zur Messung der Ionendichte. Andere Diagnostiken zur Bestimmung von Elektronen- und Ionentemperatur gelangten noch nicht zum Einsatz, sind aber im Aufbau.

Über die Ergebnisse der ersten Messungen wurde in Monterey auf der APS-Tagung berichtet /149/. In Kurzfassung lassen sich die Ergebnisse wie folgt beschreiben:

Durch Photoionisation ließ sich ein Ionenfluß von einigen 10^{11}sec^{-1} erzeugen. Eine Vergrößerung dieses Wertes um eine Größenordnung wird angestrebt. Der aus der Entladungsstrecke des Ba-Ofens austretende Störfluß von Entladungsplasma soll verringert oder beseitigt werden. Das wurde bereits im Testversuch⁺⁾ durchgeführt. Dieses störende Plasma dringt nicht in das Confinement-Gebiet ein, wie experimentell gezeigt werden konnte. Allerdings verschleiert es die Vorgänge am Limiter, da es im wesentlichen von diesem aufgefangen und gemessen wird. Die spektroskopisch gemessene Dichte beträgt typisch ca. $5 \cdot 10^7 \text{cm}^{-3}$. Die aus diesen Daten nur schwer abschätzbare Einschlußzeit stimmt ungefähr mit den Erwartungswerten überein.

Bei der Anwendung von TTMP mit einem Modulationsgrad von 1-2 % ließen sich zwei Zustände feststellen, wobei die Parameter für die Einstellung des einen oder des anderen Zustandes noch nicht untersucht werden konnten. Im ersten Fall blieben die Einschlußeigenschaften innerhalb der Meßgenauigkeit ungeändert, im zweiten Fall wurden sie erheblich verschlechtert. Genauere Messungen mit verbesserter Diagnostik und verbesserter Produktion sind im ersten Halbjahr 1973 geplant.

^{+) IPP 2/200, S. 9 und Fig. 12 (1971)}

1.3 Bestimmung der Barium-Ionen-Temperatur mittels Resonanzstreuung

Wissenschaftl. Mitarbeiter: C. Mahn; Techn. Mitarbeiter: A. Eschlewech

Streuung von Licht an dem Leuchtelektron der Barium-Ionen im Frequenzbereich einer der beiden Resonanzlinien (4554 Å oder 4934 Å) ist bereits zur lokalen Dichtemessung am W II a benutzt worden (W. Ohlendorf). Dabei wird die Summe aller über den gesamten Frequenzbereich der Linie gestreuter Photonen gemessen, ihre Zahl ist proportional der Ionen-Dichte. Wenn man dagegen die gleiche Messung frequenz aufgelöst vornimmt, erhält man Information über die Geschwindigkeits-Verteilungsfunktion der Ionen. Sind die Geschwindigkeiten isotrop und nach Maxwell verteilt, so wird das Streuspektrum ein Gaußprofil besitzen, dessen Halbwertsbreite der Iontemperatur entspricht. Das soll als Meßverfahren der Ionen-Temperatur bei den TTMP-Experimenten am W II a benutzt werden.

Die spektrale Zerlegung des Streulichts geschieht mit einem Fabry-Perot-Interferometer. Das beobachtete Volumen wird mit einer 900-Watt-Xe-Hochdrucklampe bestrahlt. Die Bandbreite (Apparateprofil des Interferometers) und zugeordnete Winkeldivergenz sind der Größe des bestrahlten Plasmavolumens angepaßt. Durch Variation des Brechungsindex im Resonator (über eine Druckänderung des Gases) kann die Resonanz-Streustrahlung nacheinander bei verschiedenen Wellenlängen empfangen werden, mit etwa 3 sec Integrationszeit. Das zunächst aufgebaute System besitzt eine relativ geringe Resonatorgüte, die Bandbreite entspricht der äquivalenten Iontemperatur von 5000° K. Die kleinste Dichte, bei der gemessen werden kann, ist $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$. Verbesserungen sind vorbereitet.

1.4 Hochfrequenz-Absorptions-Spektroskopie in W II a

Wissenschaftl. Mitarbeiter: P. Javel, A. Messiaen⁺), G. Müller, W. Ohlendorf, P. Vandenplas⁺
J.-G. Wegrowe, R. Weynants

Da optimale HF-Heizungsverfahren noch nicht bekannt sind und da zusätzlich die Frage der Wirkung des HF-Feldes auf das Plasmaconfinement weder theoretisch noch experimentell eindeutig beantwortet ist, wurde beschlossen, in Zusammenarbeit mit C.E.N.-Grenoble und E.R.M.-Brüssel im Wendelstein-Stellarator W II a ein Experiment durchzuführen, um Information zu diesen Problemen zu erhalten. Dies soll im Anschluß an das z.Zt. laufende TTMP-Barium-Experiment im W II a durchgeführt werden.

In einem breiten Frequenz-Bereich zwischen 10 kHz und 220 MHz sollen über eine vielfach-periodische Dipol- oder Quadrupol-Helix-Struktur HF-Energien bis zu 1 kW einem Wasserstoff- oder Heliumplasma mit Dichten von 10^{12} - 10^{13} cm^{-3} und Temperaturen von einigen 10 eV eingekoppelt werden. Dieses Frequenzband wurde gewählt, um die Bereiche von Transit-Time-Magnetic-Pumping, Ionenzyklotron-, magnetoakustischer- und "Lower-Hybrid"-Resonanz zu überstreichen und zu ermöglichen, die Eigenschaften geometrischer Resonanzen in der gegebenen Stellarator-konfiguration zu studieren.

Von besonderer Wichtigkeit dieses Experiments ist die Klärung der Frage nach dem Mechanismus der Energieeinkopplung. Zu diesem Zweck ist die oben genannte Antennen-Struktur gewählt worden. Geeignete Diagnostiken zur Lösung dieser Probleme sind in Vorbereitung.

Dieses Experiment wird sich voraussichtlich über die Jahre 1973/74 erstrecken und soll insbesondere Erfahrungen liefern, die zur HF-Plasmaheizung in den größeren Experimenten wie WEGA und W VII ihre Anwendung finden können.

⁺) Ecole Royale Militaire, Brüssel

2. STELLARATOR W II b

Wissenschaftl. Mitarbeiter: H. Hacker, G. Pacher, H. Renner, H. Ringler, E. Wirsching
 Techn. Mitarbeiter: J. Bömerl, F. Hoffmann, P. Iraschko, P. Voigt

2.1 Zeitablauf

Am W II b-Stellarator für Untersuchungen zur Ohm'schen Heizung von H_2 -Plasmen kam es infolge eines technischen Defekts des Hauptfeldes im Frühjahr 1972 zu Verzögerungen in der Durchführung des wissenschaftlichen Programms (Jahresbericht 1971). Die notwendige vollständige Demontage des Systems erlaubte jedoch einige Verbesserungen, die nach den Erfahrungen aus der ersten Experimentierphase nahegelegt wurden. Behindert durch notwendige Umbauarbeiten in der Halle L 3 konnte der Betrieb erst Anfang September wieder anlaufen. Nach intensiven Studien der Vorionisation mit Mikrowellen begannen Anfang Dezember die Experimente mit Ohm'scher Heizung.

2.2 Technische Änderungen

2.2.1 Hauptfeld

Neben einer wirksamen mechanischen Abstützung der Hauptfeldspulen, die zusätzlich die Lagegenauigkeit der Einzelspulen wesentlich erhöht, wurde zur Symmetrieüberwachung des Feldes ein Meßsystem mit photooptischen Kopplern vorbereitet. Die Unsymmetrie wird dabei registriert und bei Überschreiten eines vorgegebenen Toleranzwertes wird über das Sicherheitssystem eine Zwangsabschaltung herbeigeführt.

Die Stromanschlüsse des Hauptfeldes wurden verändert, sodaß nun eine wirksame Stromkompensation der Zuleitungen erreicht ist. Die Stromleitungen sind so geführt, daß die bei der Ohm'schen Heizung induzierten Spannungen ohne Einfluß auf den Magnetfeldstrom bleiben.

Die B_z -Feldspulen wurden erneuert und in günstiger Lage festgelegt.

2.2.2 Vakuum und Torus

In das Vakuumsystem wurde wegen des hohen gemessenen H_2O -Anteils im Restgas eine großflächige LN_2 -Kühlfalle eingefügt. Die störenden Einbauten im Torus wurden entfernt: der Tantal-Limiter ist durch einen Wolfram-Limiter ersetzt. Eine neue Rogowsky-Spule zur Messung des Plasmastromes wurde außerhalb des Vakuumrohres montiert. Die bisherige diamagnetische Spule wurde gegen eine aus V2A und Keramik ausgetauscht.

Zur Mikrowellenvorionisation wurden 3 Lisitanospulen im Torus eingebaut.

2.3 Diagnostik

Bei den Diagnostikaufbauten wurden einige Verbesserungen erzielt:

2.3.1 Mikrowelleninterferometer /207/

Das System wurde nach dem Ausbau im Labor überprüft und an Eichplasmen getestet. Die Bedienung wurde so verbessert, daß eine einzige Eichung für eine Experimentreihe ausreichend ist. Das Auswerteprogramm erlaubt nun in kurzer Zeit ein zeitlich und radial aufgelöstes Profil aufzustellen.

WIIb WENDELSTEIN STELLARATOR
 $l=2$ $m=5$

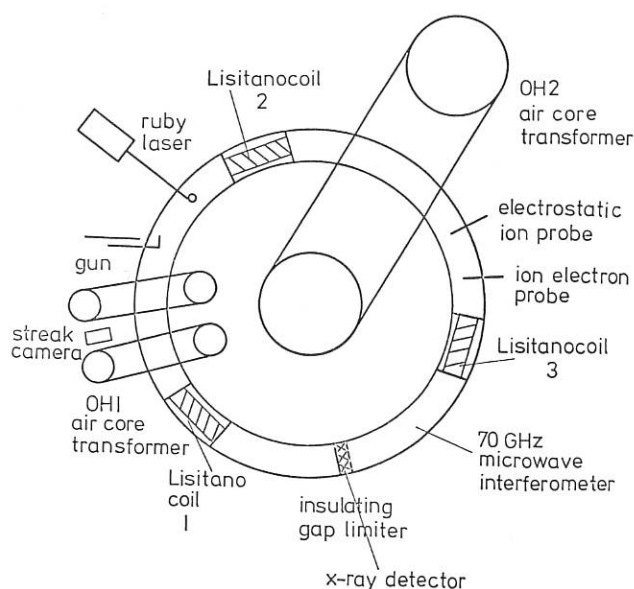


Abb. 1:

Übersicht: Wendelstein W II b
 nach dem Umbau

2.3.2 Laserstreuung

Über die lokale Messung der Elektronendichte und -temperatur wurde bereits im vergangenen Jahr berichtet. Für die spektrale Auflösung des gestreuten Laserlichts fand dabei ein Gitterspektrograph in Littrow-Aufstellung Verwendung. Das dabei erreichte Kontrastverhältnis zwischen dem Falschlicht im Zentral-Kanal und den Nebenanähen (Faktor, um den das Falschlicht abgeschwächt wird) war dabei nicht ganz zufriedenstellend. Wir haben den Spektrographen deswegen umgebaut und verwenden jetzt zwei getrennte Objektive im Gegensatz zur Autokollimation bei der Littrow-Aufstellung. Das Kontrastverhältnis für den unmittelbar neben dem Zentralkanal liegenden Kanal ist jetzt 300, für die weiteren Kanäle 3×10^3 . Dieses System soll, falls es sich am W II b bewährt, später für den W VII übernommen werden.

2.3.3 Neutralteilchenenergieanalyse

Ein Meßsystem zur Bestimmung der Ionentemperatur über die Analyse der Energie der durch Ladungsaustausch erzeugten schnellen Neutralteilchen ist im Aufbau.

2.3.4 H α -Intensitätsmessung

Räumlich und zeitlich aufgelöste Messungen der H α -Intensität zur Bestimmung der Teilcheneinschlußzeiten sind in Vorbereitung. Infolge der ungünstigen geometrischen Verhältnisse am Stellarator wird die Anordnung kompliziert.

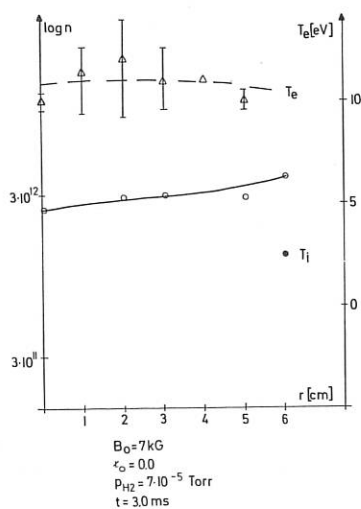
Für den Einsatz der elektronischen Datenerfassungsanlage wurde die Verkabelung der Meßleitung beendet.

Die Elektronikwerkstatt der Abteilung lieferte eine nützliche Schußzähleinrichtung (bei Benutzung von Oszillographen). Erfolgreich konnte ein schneller Analogrechner zur Darstellung der Rotationstransformation $\mathbf{t} = \mathbf{t}_o + \mathbf{t}_p$ aus den gemessenen Strömen für das Hauptfeld und die Helix zu \mathbf{t}_o und des Anteils vom Plasmastrom \mathbf{t}_p eingesetzt werden. Über die wissenschaftlichen Ergebnisse wurde auf der Frühjahrstagung der DPG in Kiel/147,207/ und auf der APS-Tagung in Monterey/Cal. /55/.

2.4 Vorionisation

Als ein ernstes Problem hat sich eine wirksame Vorionisation erwiesen: Zum Übergang in die Hauptheizphase ist eine Startdichte von einigen 10^{12} cm^{-3} bei einer Elektronentemperatur T_e um 10 eV Voraussetzung. Die bisher studierten Ionisationsverfahren wie Plasma-Gun, Elektronen-filament, HF in Kombination mit dem kleinen Transformator OH 1 (Abb. 1) waren nur teilweise erfolgreich. In allen Fällen war der runaway-Elektronenanteil sehr hoch.

In Zusammenarbeit mit Mitgliedern der Abteilung 3 (S. Corti, G. Lisitano) wurde eine nicht-resonante Plasmaerzeugung durch Mikrowellenenergie im S-Band untersucht. Über 2 Lisitano-spulen, die im Torus eingebaut wurden, wurde jeweils die Leistung eines S-Band-Generators ($N_{\text{max}} \approx 5 \text{ kW}$) eingekoppelt. In einem weiten Parameterbereich des Magnetfeldes B_o : 3 - 12 kG konnten dabei in H_2 Plasmadichten bis zu $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ erreicht werden. Die mit Sonden und über Laserstreulicht gemessenen Elektronentemperaturen lagen um 10 eV. Gittersondenmessungen am Rande der Entladung ergaben Ionentemperaturen um 4 eV. Überraschend zeigte sich das Auftreten hochenergetischer Elektronen, nachgewiesen über die Beobachtung von Röntgenphotonen mit Energien bis zu 500 keV, solange eine nichtverschwindende Rotationstransformation deren Einschluß erlaubt. In allen Fällen $\mathbf{t}_o \neq 0$ war ein Anwachsen der Röntgenenergien und -intensitäten über die Länge des Mikrowellen-Impulses, verbunden mit einer Einschnürung der Entladung auf die Achse, zu beobachten. Die Mikrowellen-Entladung konnte erst mit einer Anfangsdichte von 10^{11} cm^{-3} , die z.B. die Gun liefert, gestartet werden.



DENSITY

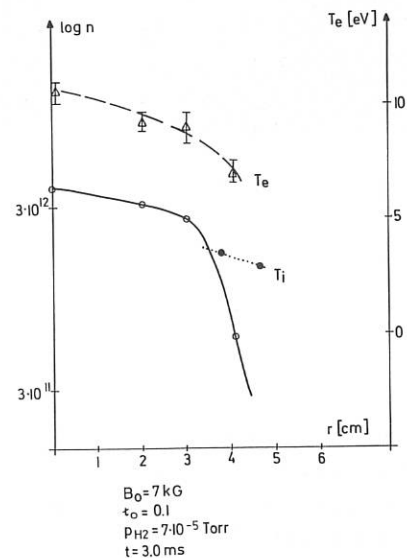
TEMPERATURE T_e [eV]

Abb. 2: Mikrowellenentladung:
2 Generatoren, S-Band,
Temperatur- und Dichte-
profil $\mathbf{t}_o = 0$

Abb. 3: Mikrowellenentladung:
2 Generatoren, S-Band,
Temperatur- und Dichte-
profil $\mathbf{t}_o = 0.1$

Vorteilhafter zur Vorionisation erscheint im Augenblick der Einsatz des OH 1-Transformators. Ein verändertes Spannungsprogramm hat zu wesentlich günstigeren Ausgangsbedingungen für die Heizung mit dem Haupttransformator OH2 geführt.

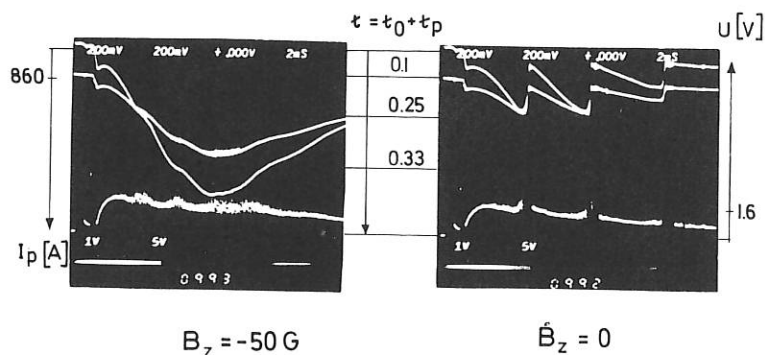
2.5 Hauptentladung

Vorläufige Ergebnisse aus der Hauptheizphase quasistationär über 5 ms bei $B_0 = 7 \text{ kG}$ mit $t_0 = 0.1$: $n_e \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ $T_e \approx 100 \text{ eV}$ mit $t_{E'} = W/N = 250 \mu\text{s}$ charakterisieren den erheblichen Fortschritt, der bei diesem Heizexperiment erzielt wurde. Die Schwierigkeiten bei rationalen Werten der Rotationstransformation $t = t_0 + t_p = 1/2, 1/3, 1/4, \dots, 1/4$ treten auch in der Hauptheizphase auf. Durch eine Überlagerung geeigneter Vertikalfelder B_z werden wesentlich höhere Heizströme erreicht.

H_2 $B_0 = 7.0 \text{ kG}$
 $p_{H_2} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$ $t_0 = 0.1$
 Preionization: gun $a = 5.0 \text{ cm}$
 OH1 a/b 8 kV
 OH2 8 / 15A

Abb. 4: Hauptentladung mit Transformator OH 2/8: Variation des Vertikalfeldes

Obere Spur: Plasmastrom I_p [A]
 Mittlere Spur: $t = t_0 + t_p$ Rotationstransformation für $r = 5.0 \text{ cm}$
 Untere Spur: Ringspannung U_R [V]



Die Frage, ob diese Verbesserung beim Durchgang durch rationale Werte von t durch die Verschiebung des Feldes oder durch die Kompensation des Vertikalfeldes des Stromringes I_p geleistet wird, soll demnächst experimentell untersucht werden. Eine Regelung für das B_z -Feld nach dem Plasmastrom I_p , um die magnetische Achse der Flächen während der Stromphase festzuhalten, ist kurz vor der Vollendung. Durch ein geeignetes Programm für das Vertikalfeld sollten sich zudem die Probleme mit runaway-Elektronen in der Startphase verkleinern.

2.6 Pläne

Neben Untersuchungen zur Vorionisation werden in Zukunft die Darstellung der Teilchen- und Energieeinschlußzeit im W II b während der Hauptheizphase im Mittelpunkt der Experimente stehen. Die Verbesserung der Diagnostik wird dabei hilfreich sein. Die Modellrechnungen für den W II b sollen ergänzt und an den experimentellen Ergebnissen der Messungen überprüft werden. Besonderes Gewicht wird die Frage nach der Rolle des Neutralgases während der Entladung haben.

Schwierigkeiten haben sich für die beabsichtigte Regeleinrichtung des helischen Stromes zu nichtrotationaler Rotationstransformation bei veränderlichem Plasmastrom ergeben: Die hohe Induktivität der Helix mit einer L/R-Zeit von 15 ms ergibt große technische Probleme. Im Vorversuch sollen nun die Möglichkeiten einer Regelung zumindest in der Stromabfallphase mit Transistorgruppen untersucht werden.

3. STELLARATOR WEGA

(C. Bayle, R. Fritsch, P. Javel⁺), H. Kotzlowski⁺⁺), W. Ohlendorf, G. Pacher, H. Pacher J.-G. Wegrowe

P. Blanc, J.-J. Capitain, G. Ichtchenko, W. Hess, P.-P. Lallia, D. Moulin, J.P. Moussy, J.K. Nguyen, G. Schenk, G. Tonon⁺⁺⁺)

Das Experiment WEGA (Wendelstein Experiment in Grenoble for the Application of RF-Heating) - ein Stellarator für HF-Heizungsexperimente - wurde von der EURATOM Groupe de Liaison im Januar 1972 als Prioritäre Aktion empfohlen. Das Projekt WEGA wird in Zusammenarbeit zwischen drei Laboratorien der EWG - CEA-SIG (Grenoble), ERM (Brüssel) und IPP (Garching) - betrieben. Die Apparatur wird vom IPP gebaut (ausschließlich des von SIG-Grenoble gelieferten Eisentrafos zur Ohm'schen Heizung mit Primär- und Vertikalwicklungen). SIG stellt die Experimentierhalle und deren notwendige Einrichtungen, sämtliche HF-, Hauptfeld- und Vertikalfeld-Generatoren sowie verschiedene Diagnostiken zur Verfügung. Die Experimente werden in Grenoble von einer Gruppe der drei Laboratorien durchgeführt (Zielsetzung, Organisation siehe Jahresbericht 1971). Es fanden während des Berichtsjahres neun gemeinsame Arbeitssitzungen (CEA-SIG, IPP und gelegentlich ERM) statt.

Die Hauptparameter der Maschine sind:

- Großer Radius	72 cm
- Kleiner Radius	19 cm
- Hauptfeld	14,4 (später 25) kG
- Helisches Feld	$l = 2, m = 5$
- Rotationstransformation	$\tau_0 = 0.3$ bei $B = 14,4$ kG
- Eisentrafo für Ohm'sche Heizung	$\varnothing = 0.44$ Wb (ohne Vormagnetisierung)
- Vorgesehene Plasmawerte:	
Plasmadichte	einige 10^{13}cm^{-3}
Plasmatemperaturen	einige 100 eV
Plasmastrom	bis 80 kA

Die verschiedenen Studien im IPP zum WEGA-Projekt im Berichtsjahr werden im folgenden resümiert.

⁺) IPP-Abt. 4; ⁺⁺) IPP-Abt. Technik; ⁺⁺⁺) CEA-SIG, Grenoble

3.1 Berechnungen des Magnetfeldes und seiner Kräfte sowie zum mechanischen Aufbau

Form und Charakteristik der magnetischen Oberflächen für verschiedene Konfigurationen der helischen Windungen (Ergebnis: Wahl des Verlaufs $d\theta/d\varphi = \text{konstant} = 2.5$ für die mittlere Linie eines helischen Leiterpakets; Ersetzung des Zentralleiters durch eine Stahlverstrebung = 16 Leiter pro Wicklungspaket - Rechnungen nach Programm Gourdon-Rehker durchgeführt von S. Rehker und C. Bayle).

Störungen der Magnetischen Oberflächen durch verschiedene Konfigurationen des Eisentrafos (Ergebnis: Wahl der "resonanten" Struktur eines Trafos mit 5 Beinen).

Kräfte auf die helischen Windungen unter Berücksichtigung der Verformung des Torusgefäßes (Ergebnis: Toruswandstärke = 3 cm - Berechnungen von B. Streibl).

Kräfte auf die Hauptfeldspulen (Ergebnis: Prinzip des Spulengerüsts - Zusammenarbeit mit Abt. Technik).

Computerzeichnungen verschiedener Projektionen des Torus zur Konstruktion der Stützen, Abstützungen usw. (Programme Eisert - Junker - Rehker - Bayle).

Netzplan (in Zusammenarbeit mit H. Schmid).

3.2 Konstruktion

- Allgemeiner Aufbau: Torus, Stützen, Isolierspalt, Wicklungen und Spulen, Trafo, Vakuumsystem, Gerüst
- Hauptfeldspulen (detailliert)
- Rohrtorus (detailliert)
- Isolierspalt
- Stützen (Prinzip und Verteilung)
- Torus, Gerüst
- Gerüst für Hauptfeldspulen
- Testaufbau der Verbindungen der helikalen Leiter.

3.3 Ausschreibungen - Bestellungen

Hauptfeldspulen (bestellt); Rohrtorus (ausgeschrieben).

Die Schwerpunkte der Tätigkeiten in Grenoble während des Berichtsjahres waren hauptsächlich:

- Ohm'scher Trafo und Vertikalfeld (Trafo bestellt: Oktober 1972)
- Vorbereitung der Experimentierhalle und des Labor-Gestells
- Speisegeräte: Zusatzspezifikationen für den Hauptfeldgenerator (gemeinsam mit PETULA bestellt); Erarbeitung der Ausschreibung für die Generatoren für das helikale Feld, das Vertikalfeld und die Ohm'sche Heizung.

- Diagnostik, insbesondere Messung der Temperaturen (T_e : Thomsonstreuung, Röntgenspektrum; T_i : Umladung, uv- und sichtbare Spektroskopie), bisher in der Organisationsphase.
- HF-Heizung: Fertigstellung der HF-Generatoren für TTMP: 135 - 200 kHz (Stand Ende 1972: 4 MW; 1 ms; vorgesehen Ende 1974: 8 MW; 10 ms) und für LH: 470 - 650 MHz (Stand Ende 1972: 50 kW cw; 100 kW, 1 ms); Entwicklung der HF-Leitungen, Anpassungssystem, Ankopplungsstrukturen und Modellaufbau (Stand: Konstruktionsphase für TTMP und LH).
- Datenerfassung und Bearbeitung (Stand: In der Definitionsphase; eine Übernahme des IPP-Systems wird ins Auge gefaßt, wobei das im IPP ausgearbeitete "software" der WEGA-Gruppe in Grenoble zur Verfügung gestellt werden soll).

Die Inbetriebnahme des Experiments in Grenoble ist für Mitte 1974 vorgesehen. Die Wahl der ersten in WEGA zu erprobenden HF-Heizmethode ist während des Berichtsjahres offengeblieben. Dies entspricht dem Prinzip des Experiments und dem flexiblen Konzept der Apparatur, die es erlauben sollen, die letzten theoretischen und experimentellen Erfahrungen in diese Entscheidung einfließen zu lassen. Diese Wahl soll Anfang 1973 getroffen werden; es werden noch TTMP, Lower-Hybrid-Heating und Ionen-Zyklotron-Heizung (wie auch Erweiterungen derselben, z.B. bei $2 \omega_{ci}$) ins Auge gefaßt.

Eine detaillierte Beschreibung des Projektstands Mitte 1972 wurde im Bericht "Present State of the WEGA-Experiment-Design" (August-September 1972) gegeben.

4. QUADRUPOL W VI

Quadrupol mit supraleitenden levitierten Innenringen.

Wissenschaftl. Mitarbeiter: H.-J. Jäckel, F. Rau

Techn. Mitarbeiter: W. Bitter⁺), A.W. Hagemann, J. Kiblinger, J. Konrad, R. Semler,
M. Schmaling

4.1 Supraleitungstechnik

4.1.1 Fortsetzung der Versuche an Nb₃Sn-Spulen⁺⁺)

Über die ersten Tests des für die W VI-Ringe vorgesehenen Nb₃Sn-Bandes in Probespulen wurde im Jahresbericht 1971 von der Abteilung Technik berichtet. Die dort aufgeführten Ergebnisse lassen eine starke Degradation der supraleitenden Spulen erkennen. In weiterführenden Experimenten wurde die Möglichkeit geprüft, durch Lagen aus Aluminiumfolie zwischen den Windungen die Spulen zu stabilisieren. Dabei zeigte sich, daß zwar die Stromdichte im Supraleiter gesteigert werden konnte, das maximal erreichte Feld jedoch gleich blieb. Eine gewisse Verbesserung des Quenchverhaltens scheint jedoch oberhalb ca. 11 K erreichbar zu sein. Auf der "Applied Superconductivity Conference" in Annapolis, Maryland wurde im Mai 1972 hierüber berichtet/203/. Weitere Ergebnisse der Untersuchungen an den Probespulen werden im Jahresbericht der Abteilung Technik angeführt.

4.1.2 Wickeln der supraleitenden W VI-Ringspulen⁺⁺⁺)

Beim Wickeln der W VI-Ringspulen wurden die an den Probespulen gewonnenen Erkenntnisse verwertet. In den Rand-pancakes, bei denen hohe Radialkomponenten des Magnetfeldes auftreten, ist Aluminiumband zwischen die Windungen eingewickelt. Die Spulen wurden auf einer von der Abteilung Technik konstruierten Wickelmaschine (Jahresbericht 1971) hergestellt. Der mechanische Zug des supraleitenden Bandes während des Wickelvorgangs

⁺) Seit 1.9.72 am MPI in Martinsried

⁺⁺) In Zusammenarbeit mit S. Wipf und A.P. Martinelli

⁺⁺⁺) In Zusammenarbeit mit Abteilung Technik

betrug 2,5 kp. Eine Druckrolle preßt beim Wickeln das Band in radialer Richtung mit ca. 10-15 kp auf den Wickelkörper.

Die beiden W VI-Spulen wurden mit insgesamt 3 Kurzschlußschalter-Prototypen ausgerüstet, die für den W VI von der Abteilung Technik entwickelt worden sind /167/.

4.2 Tieftemperaturtechnik

4.2.1 Fertigstellung von 4 Kühlstützen und Abkühlung zweier großer Kupferringe mit einer Kühlstütze auf 8 K⁺)

Die im letzten Jahresbericht beschriebenen 4 Kühlstützen zur Abkühlung der W VI-Ringe mittels Kontaktkühlung wurden fertiggestellt. Mit einer dieser Stützen wurden 2 große Kupferringe, die in ihren wesentlichen Dimensionen (Durchmesser, Gewicht: 60 cm, 164 kg; bzw. 120 cm, 272 kg) den W VI-Ringen gleichen, bis auf 8 K abgekühlt. Die Enthalpiedifferenz zwischen 300 K und 8 K beträgt 13 MJ für den kleineren und 22 MJ für den größeren Ring. Zur Abkühlung wurden bei einem mittleren Verbrauch von 1,5 l/h Kühlmittel (flüssiger Stickstoff oberhalb 80 K, flüssiges Helium unterhalb 80 K) 3,5 Tage benötigt. Die nutzbare Kälteleitung der Kühlstütze wurde mit 0,5 W bei 8 K bzw. 1 W bei 9 K gemessen, der Wirkungsgrad betrug bei 8 K 0,4 %, bei 10 K 10 %. Über die Ergebnisse wurde auf der "International Cryogenic Engineering Conference 4 (ICEC 4)" in Eindhoven im Mai 1972 vorgetragen /88/.

4.2.2 Test des Prototyps eines heliumgekühlten Stromkontaktes zur galvanischen Stromspeisung im Vakuum bei tiefen Temperaturen

Es ist vorgesehen, den Strom in die W VI-Ringe mittels heliumgekühlter, von außerhalb des Vakuumtanks manipulierbarer Stromkontakte einzuspeisen. Ein erster Prototyp einer solchen Stromzuführung wurde gebaut und einer Reihe von Tests unterzogen. Heliumgasbeschickte Druckdosen preßten dabei die Kontakte gegen Nb₃Sn-Bänder, die auf einem Trägerkörper aus Kupfer aufgelötet sind. Der komplexe Aufbau dieser Stromzuführung zeigte eine Reihe von Defekten, sodaß es nicht möglich war, Temperaturen wesentlich unter 20 K zu erreichen. Der kleinste erreichte Übergangswiderstand betrug 0,15 mΩ bei 100 A, wobei sich Kontakt und Gegenstück merklich erwärmten.

4.2.3 Fertigstellung eines Testdewars zur Erprobung der supraleitenden W VI-Ringspulen

Für den W VI-Vakuumtank wurde ein LHe-Einsatz zum Test der supraleitenden W VI-Ringspulen fertiggestellt⁺⁺⁾ und bei Raumtemperatur und der Temperatur des flüssigen Stickstoff auf Vakuumdichtigkeit geprüft. Als tieftemperaturgeeignetes und billiges Dichtematerial für die Flansche und den Deckel hat sich dabei Zinn Draht erwiesen.

4.2.4 Eichung von Hallsonden bei Temperaturen zwischen 4,2 K und 80 K

Die für den Test der W VI-Spulen vorgesehenen Hallsonden wurden im Temperaturbereich 4,2 - 80 K bei Magnetfeldern bis 0,5 T geeicht. Die gemessene Hallspannung war bei konstantem Feld dem Steuerstrom proportional. Die Sonden zeigten eine gewisse Streuung, sowohl der Empfindlichkeit als auch der Temperaturabhängigkeit.

⁺) In Zusammenarbeit mit A. Elsner

⁺⁺⁾) IPP-Abteilung Technik

4.2.5 Konstruktion eines stickstoffgekühlten Strahlungsschirms^{+))}

Für den W VI wurde ein stickstoffgekühlter Strahlungsschirm konstruiert, der neben der Abschirmung der schwebenden Ringe gegen die thermische Zustrahlung von außen die Aufgabe hat, als Stoßfänger der Ringe im Katastrophenfall zu dienen. Zu diesem Zweck ist der Schirm (Kupfer, 6 mm stark) an seinem Umfang in vertikaler und radialer Richtung auf Federn gelagert.

4.3 Elektronik

Ein gleichstromgekoppelter, kurzschlußfester, symmetrischer 4 kW-Verstärker, der Ströme bis ± 200 A liefern kann, wurde fertiggestellt und erfolgreich getestet. Der Verstärker soll die Stabilisierungsspulen speisen, die die schwebenden Ringe in der Soll-Lage halten. Die Versorgungsspannungen von ± 24 V liefern Bleiakkus. Die weitere Aufbauphase sieht Speisenspannungen von ± 48 V und Lastströme bis 1000 A vor.

4.4 Dynamik und Stabilisierung schwebender Ringe

Zum Test des Regelkreises zur Lagestabilisierung schwebender Ringe wurde ein Vorexperiment aufgebaut. Im Magnetfeld einer festgehaltenen Ringspule (120 cm \varnothing , 68 Wdg.) wurde eine zweite Spule (60 cm \varnothing , 145 Wdg.) in einer radialen Richtung beweglich aufgehängt. Bei Strömen bis 500 A je Spule und Auslenkungen bis 1,5 cm konnte die Lage einer Ringspule stabilisiert werden. Einige Mängel des Aufbaus bedürfen jedoch noch der Verbesserung.

Die Bewegungsgleichung dieses Systems wurde für unterschiedliche Anfangsstörungen gelöst; als Parameter gehen neben den Massen und Strömen in beiden Ringen die Aufteilung des Stabilisierungsstromes in Komponenten proportional der Lage und der Geschwindigkeit des bewegten Ringes ein. Die Ringspule läßt sich stabilisieren, solange der erforderliche Stabilisierungsstrom einen vorgegebenen Maximalwert nicht überschreitet. Anwachsraten der Instabilität und Frequenzen der stabilen gedämpften Schwingung liegen im Bereich von 1 bis 3 Hz.

4.5 Fortsetzung der Experimente zur Plasmaproduktion mittels ECRH im W VQ⁺⁺⁾

Die Experimente am W VQ zur Plasmaproduktion mittels ECRH bereiten die Anwendung dieser Methode im W VI vor. Bisherige Untersuchungen mit Argon als Arbeitgas wurden vorläufig abgeschlossen. Bei Dichten von etwa 10^{11} cm^{-3} und Elektronentemperaturen von etwa 3-10 eV wurde eine Einschlußzeit der Größenordnung von 1 ms abgeschätzt. Die Ergebnisse wurden auf der DPG-Tagung in Kiel referiert/86/. Weitere Untersuchungen mit He und Studium des Zündvorgangs sind im W VI-Programm vorgesehen.

5. DATENVERARBEITUNGSANLAGE

Wissenschaftl. Mitarbeiter: H.F. Krikava; Technische Mitarbeiter: E. Ostner

Im Jahre 1972 wurde die Datenverarbeitungsanlage um folgende Geräte erweitert:

^{+))} In Zusammenarbeit mit H. Kotzlowski und R. Hadersbeck

⁺⁺⁾ In Zusammenarbeit mit R. Ellis (Gastforscher)

- 1) DECTape von DEC 150 k/16-bit Wort, 300 μ sec/Wort
- 2) DEC-Writer (LA 30) 30 Zeichen/Sek
- 3) Computer Terminal Tektronix 4010 bis 3000 Zeichen/Sek
- 4) Standard-Interface: A-Karte (programmierbar)
B-Karte (direkter Kernspeicherzugriff)
- 5) 2 CAMA-Crates mit dazu gehörigen Steuermodulen und Interface zum PDP-11/20 Computer
- 6) CAMA-Module (ADC, Zeitmarkengenerator und Verstärker)
- 7) Diese Module werden von der Hardware Sektion des plasmaphysikalischen Institutes in Culham/England geliefert.
- 8) Ein programmierbares Interface für den Miniverter (32 Kanäle ADC und 4 Kanäle DAC) wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung Technik entworfen und gebaut.

Parallel dazu wurde das modulare Datenverarbeitungssystem entwickelt. Dieses umfaßt insbesondere die Bedienungsrouitinen der externen Geräte, die Routinen zur Erfassung der Daten sowie Programme, die eine Rohauswertung bewerkstelligen. Die Ausgabe dieser Rohauswertung erfolgt in Form einer graphischen Darstellung bzw. in Form einer Tabelle.

Auf der Ausgestaltung des endgültigen Standortes unseres Computererfassungssystems wurde besonderer Augenmerk gelegt. Der Raum wurde mit einer Klimaanlage ausgestattet, die auch die Feuchtigkeit zu regulieren vermag. Koaxleitungen vom Experiment her mit ihren analogen Signalen werden auf eine zentrale Steckerleiste geführt, von der eine bestimmte Auswahl von Leitungen an die entsprechenden ADC etc. geführt werden.

6. ÜBRIGE ARBEITEN

6.1 Erzeugung von Stellaratorfeldern durch poloidal geschlossene Spulen (Theorie)

Wissenschaftl. Mitarbeiter: S. Rehker, H. Wobig; Programmiererin: V. Welge

Durch numerische Rechnungen wurde gezeigt, daß durch poloidal geschlossene, aber nicht ebene Spulen toroidale magnetische Flächen erzeugt werden können /206/. Das Herausdrehen der Spule aus der Ebene erzeugt eine toroidale Stromkomponente, eine Versetzung der einzelnen Spulen zueinander simuliert dann auf diese Weise die helikalen Windungen des konventionellen Stellarators. Durch eine elliptische Verformung kann die Spule der Form der magnetischen Fläche angepaßt werden. In den numerischen Rechnungen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- 1) Ein Spulensystem dieser Art erzeugt magnetische Flächen mit einer Rotationstransformation bis zu $t = 1/3$.
- 2) Durch Kombination von $l = 2$ und $l = 3$ -Komponenten läßt sich eine Verscherung unabhängig von t erzeugen.
- 3) Der Hauptbeitrag zur Rotationstransformation wird von den toroidalen Stromkomponenten der Spule geleistet und nicht von der elliptischen Verformung.

Bei der Verwendung eines solchen Spulensystems ergeben sich für den Stellarator folgende Vorteile:

- 1) Das Vakuumrohr wird von den Kräften der helikalen Windungen entlastet.
- 2) Die Zugänglichkeit zum Vakuumrohr wird erhöht.

6.2 Kinetische Gleichung des Neutralgases in der Plasmarandschicht (Theorie)

Wissenschaftl. Mitarbeiter: S. Rehker, H. Wobig

Programmiererin: V. Welge

Die Untersuchung beschäftigte sich mit der Boltzmann-Gleichung des Neutralgases in der Plasmarandschicht. Als Elementarprozesse wurden die Stoßionisation und der Ladungsaustausch berücksichtigt. Aus der Boltzmann-Gleichung ließ sich eine Integralgleichung für die Dichte des Neutralgases ableiten. Der Kern dieser Integralgleichung hängt von dem Reflexionsmechanismus der Neutralteilchen auf der Wand ab. Die Integralgleichung wurde in eindimensionaler Geometrie numerisch gelöst, wobei als Reflexionsmechanismus ideale und diffuse Reflexion in Betracht gezogen wurden. Durch die Reflexion erhöht sich die Neutralgasdichte in der Randschicht maximal um den Faktor 3-4 gegenüber dem Fall ohne Reflexion. Weiterhin zeigt die Verteilungsfunktion der die Randschicht verlassenden Teilchen eine Abweichung von der Maxwell-Verteilung, diese hat ihre Ursache in der Inhomogenität der Randschicht.

6.3 Supraleitende Energiespeicher ("Feasibility Study")

Wissenschaftl. Mitarbeiter: S.L. Wipf

Bis jetzt finden induktive Energiespeicher mit Ausnahme einiger Spezialfälle praktisch noch keine Anwendung, obschon sie bei genügender Größe (≈ 10 MJ) und hoher Entladungsgeschwindigkeit ($\lesssim 0.1$ sec) ökonomisch vorteilhafter sind als Alternativen. Ein weiteres Vorteil ist die relativ hohe Energiedichte, die bis 100 J/cm^3 erreichen kann; (zum Vergleich: $\sim 1 \text{ J/cm}^3$ für Kapazität). Eine Studie der Realisierungsmöglichkeiten behandelt die Prinzipien der Optimierung der Spulenform, und skizziert die grundlegenden Probleme beim Entladungsprozeß. Es zeigt sich dabei, daß Verluste bei der Entladung in einen induktiven Verbraucher nur schwer zu vermeiden sind, wenn die Vorteile der hohen Energiedichte oder der raschen Entladung nicht aufgegeben werden sollen. Zwei weitere Probleme, denen die heutige Technologie noch nicht gewachsen ist, sind ein geeigneter Kryoschalter, wobei man als Schaltprozeß den Phasenübergang normal - supraleitend verwenden würde, sowie ein Leiter für die Speicherspule, dessen Wechselstromverluste so klein sind, daß der supraleitende Zustand während der Entladung beibehalten wird. Die Entwicklung supraleitender Energiespeicher ist von größter Bedeutung in der auf einen Fusionsreaktor hinzielenden Plasmaphysik.

6.4 Zeitlich aufgelöste Messung der Elektronendichte mittels Thomsonstreuung mit einem kontinuierlich arbeitenden Argon-Ionen-Laser

Wissenschaftl. Mitarbeiter: M.v.Hellermann

Infolge der verzögerten Lieferung des 250-Watt Argon-Ionen-Lasers, der für das IPP vom Institut für angewandte Physik, Heidelberg entwickelt wird, wurden zunächst Vorversuche mit einem 8-Watt Argon-Ionen-Laser unternommen.

Bei diesen Vorversuchen wurde die Thomsonstreuung an ungebundenen Elektronen durch Rayleigh-Streuung an gebundenen Elektronen von neutralem Argon bei einem Gasdruck zwischen 5×10^{-3} und 5 Torr simuliert. Das Rayleighsignal bei einem Gasdruck von 1 Torr entspricht hierbei einem Thomsonsignal bei einer Elektronendichte von $2.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

Die untere Grenze der Thomson- bzw. Rayleighstreuung ist einerseits durch das Falschlicht - d.h. Streuung an Toruswand, Einfallrohr etc. - und andererseits durch die Nachweisgrenze der (Thomson-) gestreuten Photonen pro Zählzeit gegeben. Durch optisches Optimieren konnte der Falschlichtpegel bis auf ein Niveau herabgesetzt werden, das einer Elektronendichte von $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ entspricht. In diesem Bereich war die mittlere Schwankung des Falschlichtsignals

- hervorgerufen durch die Statistik der Photoelektronen - ungefähr von der Größenordnung des Nutzsignals.

Eine Extrapolation dieser Daten zeigt, daß die Nachweisgrenze bei stationären Plasmen niedriger Elektronendichte (z.B. W II a, $n_e \approx 10^9 \text{ cm}^{-3}$) durch das Falschlicht und bei gepulsten Plasmen höherer Dichte (z.B. W II b, $n_e \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) durch die absolute (Nutz-) Photoelektronenzahl pro Meßzeit gegeben ist. Hieraus läßt sich folgern, daß bei einer Laserleistung von 250 Watt eine zeitlich aufgelöste Dichtemessung mit einer Zählzeit von 1 ms bei einer Elektronendichte von 10^{13} cm^{-3} mit einem Fehler von ca. 10 % möglich ist.

6.5 Streuung von Laserlicht an einem Bogenplasma

Wissenschaftl. Mitarbeiter: D. Ludwig⁺), C. Mahn, H. Ringler, Techn. Mitarbeiter:

A. Eschlwech, P. Voigt

Die Untersuchungen der "Anomalien" in den Streuspektren wurden abgeschlossen (IPP III/5). Diese Anomalien äußern sich in Abweichungen der gemessenen Spektren von denen eines thermischen Plasmas, und zwar im Auftreten einer großen Anzahl von "Satelliten", die sich ziemlich unregelmäßig über das ganze Spektrum verteilen. Mit 0.3 bis 0.5 Å Auflösung wurden Spektren bei sieben verschiedenen Streuwinkeln, von 90° bis 15°, vermessen, und aus diesem Ergebnis wurden die Abweichungen vom thermischen Spektrum über einer $k-\omega$ -Ebene aufgetragen. Dabei deuten sich einzelne "Moden" an. Wir nehmen an, daß die beobachteten "anomalen" Strukturen von elektrostatischen Schwingungen oder Turbulenzen verursacht werden.

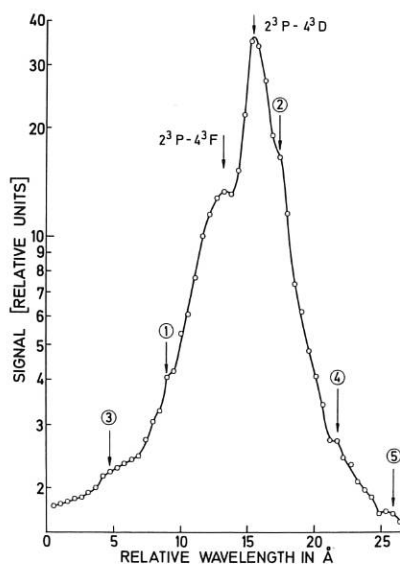


Abb. 5: Gemessenes Linienprofil
He I 2^3P-4^3D 4471 Å

Die Existenz dieser hochfrequenten elektrostatischen Schwingungen wurde spektroskopisch mit Hilfe des sogenannten Hochfrequenz-Stark-Effektes nachgewiesen. Dabei werden durch

⁺) Seit 1.12.1972 bei: Fa. Messerschmidt-Bölkow, Schrobenhausen

das Vorhandensein der elektrischen Felder Mehrquantenübergänge induziert, die als Satellitenlinien normalerweise verbotener Linien auftreten. Die Messungen wurden an einer neutralen Heliumlinie HeI 2^3P-4^3D 4471 Å und ihrer verbotenen Komponente 2^3P-4^3F durchgeführt. Abb. 5 zeigt das gemessene Linienprofil. Zusätzlich zu diesen erwarteten Linien erhält man Satellitenlinien (①, ②, ③ und ④). Die Existenz dieser Satelliten kann durch das Vorhandensein von hochfrequenten elektrischen Feldern der Frequenz $\omega_{HF} = 2\pi \times 6.3 \times 10^{11} \text{sec}^{-1}$, $2\omega_{HF}$ und $3\omega_{HF}$ erklärt werden. Durch unabhängige spektroskopische Elektronendichtemessungen konnte gezeigt werden, daß es sich bei dieser Frequenz ω_{HF} um die Plasmafrequenz ω_P handelt. Darüber wurde auf der Frühjahrstagung der DPG in Kiel 1972 /209/ und in Physics Letters /208/ berichtet. Die Herkunft dieser elektrostatischen Schwingungen ist dabei nach wie vor ungeklärt.

Bezüglich der Streuspektren schlagen wir vor, daß die Streutheorie das Vorhandensein von schmalbandigen überthermischen Oszillationen in der Art einer Frequenzmodulation berücksichtigen muß (wie beim Elektronen-Gyroeffekt), und nicht in der Art einer Amplitudenmodulation, die nur zur Beschreibung fast thermischer Fluktuationen ausreicht.

6.6 Dynamische Stabilisierung und Anregung parametrischer Instabilitäten in Flüssigkeiten

Wissenschaftl. Mitarbeiter: F.M. Hoffmann

Die im letzten Jahresbericht beschriebenen Untersuchungen zur Anregung von parametrischen Instabilitäten in Flüssigkeitsgrenzschichten wurden im laufenden Berichtsjahr fortgeführt. Außerdem wurde der Einfluß einer nicht-harmonischen Zeitabhängigkeit der stabilisierenden Oszillationen auf dynamisch-stabilisierte Flüssigkeitsgrenzschichten untersucht. Über Ergebnisse hierzu wurde im IPP-Report 2/205 berichtet.

6.7 Optische Diagnostik

Wissenschaftl. Mitarbeiter: C.O.L. Juulman

Die Realisierbarkeit eines monochromatischen Kamerasystems zur Wiedergabe der räumlichen Intensitätsverteilung optischer Emissionsstrahlung aus dem Stellaratorplasma des W II b wurde untersucht. Berechnungen achromatischer Linsensysteme, die auch im UV-Gebiet verwendbar sind, werden durchgeführt.

PROJEKT WENDELSTEIN VII

Für den Aufbau des Stellarators Wendelstein VII werden wesentliche Teile der Personalkapazität einiger Abteilungen des IPP, insbesondere der Abteilungen "Experimentelle Plasmaphysik 2" (E2) und "Technik" (TE) benötigt. Aus diesem Grund, und um eine zusammenhängende Berichterstattung zu ermöglichen, erschien es zweckmäßig, über dieses Projekt nicht nach Abteilungen getrennt zu berichten.

Etwa im April des Berichtsjahres wurde die W VII-bezogene Zusammenarbeit mehrerer Abteilungen intensiviert und die bis dahin hauptsächlich von der Abteilung E2 getragene Planungsarbeit an das neugegründete W VII-Team übertragen.

Wegen der Vielfalt der Aufgaben wurden insgesamt 19 Gruppen gebildet. Jede dieser Gruppen bearbeitet ein abgegrenztes Aufgabengebiet, das sich entweder von einer Projektkomponente oder von einer das Gesamtprojekt betreffenden Tätigkeit ableitet.

Im folgenden berichtet jede dieser Gruppen. Von den dabei genannten Mitarbeitern haben die meisten (etwa drei Viertel) noch weitere, außerhalb des W VII liegende Aufgaben.

1. Projektleitung

Mitarbeiter:

M. Blaumoser, G. Duesing, K. Freudenberger, J. Junker, A. Knobloch, J. Kolos,
M. Kottmair, G. Wolf, G. Wulff

Aufgabenbereich:

Projektmanagement in der Aufbauphase des W VII.

1.1 Organisation

Die eingangs erwähnte Form der Zusammenarbeit findet ihren Ausdruck im W VII-Organisationsplan, der projektbegleitend modifiziert und dadurch den sich ändernden Anforderungen angepaßt wird. Die bisherigen Erfahrungen mit der gewählten Organisationsform sind insgesamt positiv.

1.2 Physik und Technik

Die physikalische Motivation ebenso wie das technische Konzept des Projekts blieben gegenüber früher genannten Vorstellungen unverändert. Für die Ohm'sche Heizung des Plasmas fiel die Entscheidung zugunsten eines eisenlosen Transformators mit "offener Geometrie" (Pkt. 8.1).

1.3 Stand des Projekts

Bezüglich der Hauptkomponenten des W VII liegt folgende Situation vor:

Wie die Netzpläne zeigen, ist die Komponente Torus mit Helix maßgebend für den Fertigstellungstermin des W VII. Die fristgerechte Lieferung dieser Komponente (erstes Halbjahr 1975) erscheint nur möglich, wenn es in Kürze zur Auftragserteilung kommt.

Die beiden Hauptfeldprototypspulen werden bereits gefertigt. Die übrigen Spulen können vertragsgemäß bis zum 1.4.1974 geliefert werden. Voraussetzung dafür ist die Freigabe der Serienfertigung Mitte 1973, nach erfolgreicher Prüfung der beiden Prototypen.

Der 1971 in Auftrag gegebene 1,45 GJ Stobleistungsumformer wird ebenfalls bis zum 1.4.1974 geliefert.

Das Gerüst befindet sich in der Konstruktionsphase und kann bis Anfang nächsten Jahres fertiggestellt werden, wenn einige noch offenen Probleme in der vorgesehenen Zeit befriedigend gelöst werden können.

Die übrigen Komponenten sind in Bezug auf den Abschluß der Aufbauphase weniger kritisch. Im Hinblick auf das Neutralteilchen-Vorversuchsprogramm erweist sich der notwendige Anbau an die Experimentierhalle L7 (Pkt. 2.3), in dem u.a. der 2,5 MW Umformer und die Hochspannungsanlage für den Teilcheneinschuß untergebracht werden, als zeitlich problematisch.

2. Koordinierung

Mitarbeiter:

M. Blaumoser, A. Elsner, H. Goss, F.W. Hoffmann

Aufgabenbereich:

Koordinierung mit dem Ziel der Anpassung aller Komponenten in topologischer, konstruktiver und elektromagnetischer Hinsicht.

Gesamtmontage, Raumd disposition, Dokumentation und Ringbuch.

2.1 Anpassung

Die Komponenten des Projekts wurden bedarfsweise auf ihre topologische, konstruktive und elektromagnetische Verträglichkeit hin untersucht und entsprechend beeinflusst. Diese Aktivitäten konzentrierten sich vor allem auf die Hauptfeldspulen, das Hauptgerüst, den OH-Transformator und die mit diesen Baugruppen gekoppelten Elemente.

2.2 Gesamtmontage

Anhand des Übersichtsplanes (Abb. 1) soll der Montageablauf des W VII kurz skizziert werden.

- a Vormontage der unteren OH-Trafo-Spulen und der untersten Vertikalfeldspule
- b Befestigung des Stützringes und des unteren Tragringes auf dem Fundament
- c Endmontage der Elemente vom Pkt. a (Befestigung noch nicht endgültig geklärt)
- d Montage des Torus auf den Torusabstützungen (der obere Tragring ist noch nicht montiert)
- e "Einfädeln" der Hauptfeldspulen durch die im Torus durch Herausnahme des Zwischenstücks entstandene Lücke, wobei jeweils bei Bedarf eine Torusabstützung abgesenkt werden kann
- f Montage des Toruszwischenstückes
- g Vormontage der Hauptfeldspulen
- h Montage des oberen Tragringes
- i Grobjustierung der Hauptfeldspulen (durch Marken am Gerüst und an den Spulen)
- j Montage der Vakuumeinrichtungen und der restlichen OH-Trafo- und Vertikalfeldspulen
- k Feinjustierung der Hauptfeldspulen (mittels Elektronenstrahl)
- l Montage von Diagnostik, Kühlung und dergl.

Für die Torusmontage (Gewicht ca. 40 Mp) wird ein weiterer Kran mit 25 Mp Tragkraft in Halle L7 installiert.

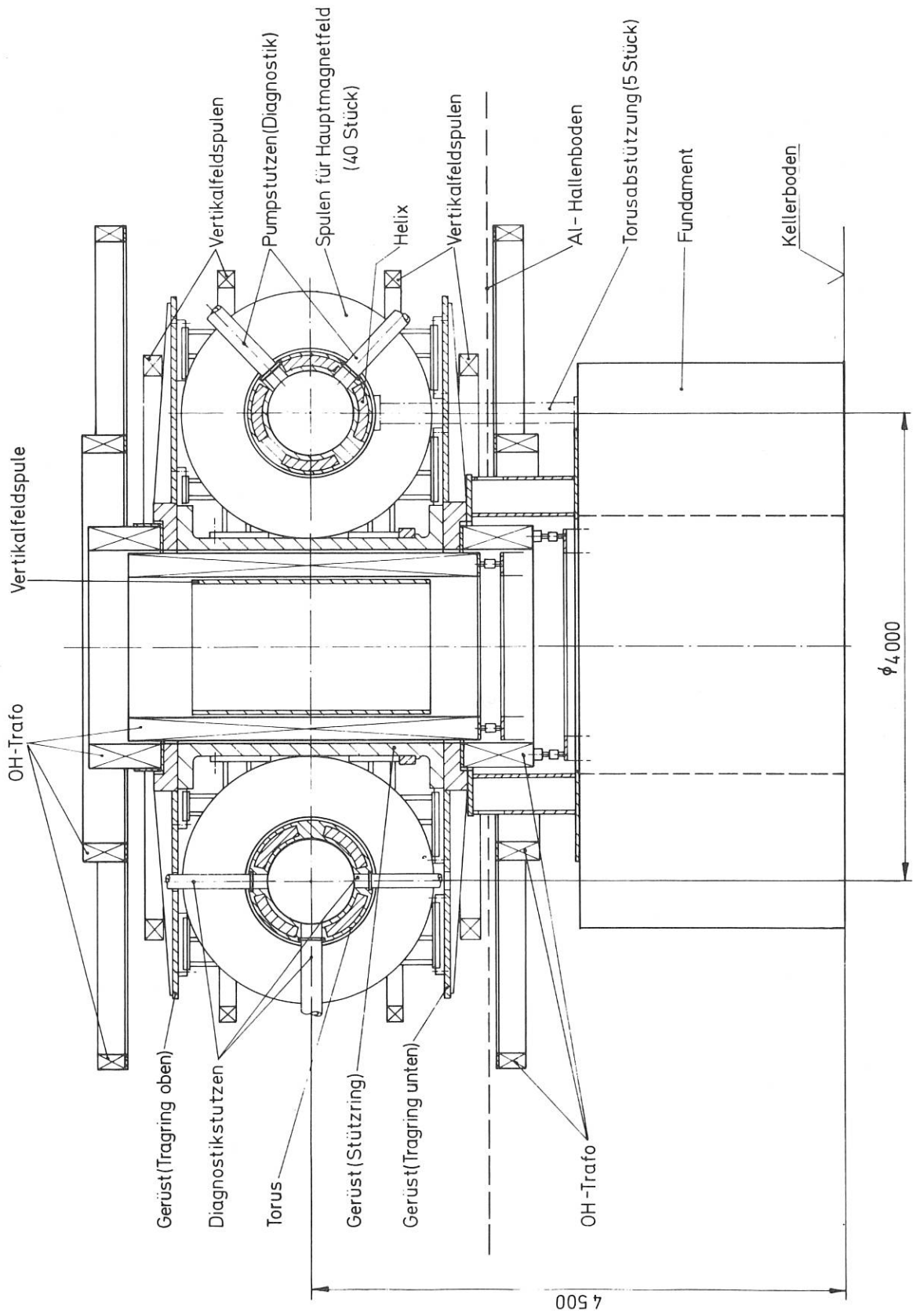


Abb. 1 W VII - Übersicht

2.3 Raumdisposition

Der Raumbedarf für Hilfseinrichtungen, insbesondere für Plasmaheizungs- und Diagnostikeinrichtungen, ist stark angewachsen. Dem soll durch die Errichtung eines unterkellerten, erdgeschossigen 7 m breiten Anbaues längs der Südseite von Halle L7 Rechnung getragen werden. Es ist vorgesehen, im Keller dieses Erweiterungsbaus Wasserpumpen für Kühlzwecke, einen 2,5 MW-Generator und Hochspannungseinrichtungen für den Neutralteilcheneinschuß, Hochspannungseinrichtungen für den OH-Transformator sowie das Shuntsystem der Helix aufzustellen. Im Erdgeschoß sollen im wesentlichen die erforderlichen Laborräume zur Vorbereitung diagnostischer Messungen eingerichtet werden.

2.4 Dokumentation und Ringbuch

Aus Gründen der Transparenz von Entscheidungsvorgängen wurde im Berichtsjahr eine Dokumentation aufgebaut, in der alle W VII-relevanten Unterlagen archiviert werden.

Als übersichtliche Arbeitsgrundlage wurde das sog. Ringbuch geschaffen, das projektbegleitend mit verbindlichen und aktuellen W VII-Daten in Kurzfassung beschickt wird.

3. Planüberwachung

Mitarbeiter:

E. Müller (Abt. Theorie), H. Schmid

Aufgabenbereich:

Netzplantechnische Betreuung des Projekts

Das vorhandene Netzplanrechenprogramm wurde modifiziert und erweitert. Neben der normalen Netzplanberechnung kann mit diesem Programm eine additive Kapazitäts- und Kostenanalyse durchgeführt werden. Diese beiden Gebiete wurden zu den umfangreichen Ausgabemöglichkeiten des Programms dazugenommen.

Der Gesamtnetzplan der Projektleitungsgruppe wurde mit Hilfe der Rechenanlage IBM 360/91 ausgedruckt. Dieser Netzplan, aus dem der Projektablauf mit seinen Vorgängen und deren Verknüpfungen ersichtlich ist, wurde laufend einer detaillierten Analyse unterzogen. Die angewandte Netzplantechnikmethode MPM und die Benutzung des Zeichenprogramms an der Rechenanlage gestatteten es, Änderungen im Ablauf sofort in den bestehenden Netzplan einfließen zu lassen. Den Vorgängen einiger Projektkomponenten konnten Schätzzeiten zugeordnet werden. Bei den Komponenten "Hauptgenerator, 1,45 GJ" und den Hauptfeldspulen wurden die aufgrund der Ausschreibungsbedingungen von den jeweiligen Herstellern gelieferten Detailnetzpläne in den Gesamtnetzplan eingebracht. Außerdem enthält der Gesamtplan die wichtigsten Daten der Detailpläne "Torus mit Helix" und "Gerüst". Für die Hauptfeldspulen-Prototypen wurde eine detaillierte Zeit-, Kapazitäts- und Kostenabschätzung durchgeführt.

4. Berechnungen

Mitarbeiter:

I. Horn, Ch. Ludescher, H. Kotzlowski, R. Pöhlchen, B. Streibl

Aufgabenbereich:

Berechnung magnetischer Felder, Induktivitäten, magnetischer Kräfte und mechanischer Spannungen und Deformationen von Wicklungen und Bauteilen.

4.1 Magnetfeld-Berechnungen

4.1.1 Feldlinien toroidaler Stellaratoren

Das IPP-Computerprogramm zur Feldlinienberechnung toroidaler Stellaratoren (ect.), das aus 5 Teilprogrammen bestand, wurde in Overlayversionen zu zwei Komplexen zusammengefaßt.

- a) Magnetfeldberechnung
- b) Feldlinienberechnung, Feldlinien-Plot und Auswertung

Parametervariationen lassen sich jetzt wesentlich schneller durchführen.

4.1.2 Hauptmagnetfeld

Berechnet wurden - mit dem schon für die supraleitende Version entwickelten Programm - das resultierende Hauptmagnetfeld und der Ripple des Hauptmagnetfeldes unter Berücksichtigung der räumlichen Stromverteilung und der ϑ -Komponente des Stromes (siehe Bild 19 im IPP-Bericht 2/204).

4.1.2.1 Hauptmagnetfeld-Sonderspulen

Für den Neutralteilcheneinschuß müssen vier besondere Hauptfeldspulen vorgesehen werden, die Störungen des Hauptfeldes verursachen. Es war zu untersuchen, ob dadurch ein "Aufbrechen" der magnetischen Oberflächen entsteht.

Es zeigte sich, daß die magnetischen Oberflächen zwar erhalten bleiben, jedoch in φ -Richtung Verbiegungen des Oberflächenschlauches auftreten, die tolerabel sind. Ripple-Berechnungen längs Kreisbögen und längs Feldlinien bei eingebauten Sonderspulen für einige mögliche Sonderspulenabmessungen zeigten, daß Magnetfeldspiegel entstehen, die nicht mehr klein gegen die helischen Spiegel sind.

4.1.2.2 Störfelder der Hauptfeldspule

Aufgrund der Fertigungsweise der Hauptfeldspule entstehen Abweichungen der Spulenströme von der gewünschten idealen Solenoidgeometrie (axialer Überstieg und radiale Überstiege, Spulenabschrägung). Die Spulenströme konnten durch eine Überlagerung von Störströmen und idealen Solenoidströmen modellhaft beschrieben werden. Damit war die getrennte Berechnung der Störfelder nach Betrag und Phase numerisch möglich.

4.1.3 Vertikalfeldspulen und OH-Trafo-Feld

Zahlreiche Magnetfeldberechnungen trugen zur Festlegung der Abmessungen und Lage der Vertikalfeldspulen und der OH-Trafo-Spulen bei. (Berechnung der Feldstärkekomponenten und Feldlinien)

4.2 Berechnung magnetischer Kräfte und der daraus resultierenden mechanischen Spannungen

4.2.1 Magnetische Kräfte und Kraftdichtefeld der Hauptfeldspulen und ihre mechanische Beanspruchung

Berechnet wurden die vom Hauptfeld selbst verursachten magnetischen Kräfte je Hauptfeldspule, sowohl für den Normalbetrieb als auch im Fall der Stromlosigkeit einer Spule sowie einer Hälfte des Spulensystems (siehe die Bilder 21 und 22 im IPP-Bericht 2/204). Den Ausschreibungsunterlagen wurde das entsprechende Kraftdichtefeld als Grundlage für Festigkeitsrechnungen beigelegt.

Eine erste Abschätzung der mechanischen Beanspruchung der Hauptfeldspulen im Normalbetrieb (IPP-Bericht 2/204, Bild 23) konnte durch Ermittlung der analytischen Lösung des Diff.-Gleichungssystems für den ebenen Spannungszustand, für den realistischen nicht achsensymmetrischen Belastungsfall (Lorentz-Kräfte nicht achsensymmetrisch, einseitige Abstützung der Zentripetalkraft je Spule) wesentlich verbessert werden.

4.2.2 Mechanische Beanspruchung des Systems helische Leiter/Torusrohr

Zum Entwurf der Stützstruktur für Torus mit Helix waren Abschätzungen nötig, die Aufschluß über Art und Betrag der entstehenden mechanischen Spannungen lieferten. Die Abschätzungen wurden für ein zylindrisches Modell isotroper mechanischer Struktur gemacht und zwar in zwei Schritten:

- a) unendlich langes Rohr mit variabler Helixsteigung und beliebiger Multipolanordnung (Computer-Code KESLAV, Lösung der Diff. Gln. der Schalentheorie durch einen geeigneten Ansatz)
- b) Untersuchung der Randdeformationen eines Helixrohres endlicher Länge um Aufschluß über die Dichtungsprobleme und die zweckmäßige mechanische Verbindung am Zwischenstück zu erhalten.

Das Programm STRUDL wurde gekauft. Es dient im wesentlichen zur Berechnung mechanischer Strukturprobleme (auch dreidimensionaler) mit der Finite-Element-Methode. Die Implementierung dieses Programmes erforderte aufgrund seines Umfangs und seiner komplexen Struktur eine intensive Zusammenarbeit mit der Systemgruppe des IPP sowie des Programmlieferanten. Testrechnungen auch für umfangreiche Beispiele verliefen zufriedenstellend.

Eine Benutzungsbeschreibung bezogen auf das AMOS-System des IPP wurde angefertigt, anhand der auch andere Gruppen des Institutes das Programm benutzen können.

Mit STRUDL sollen im Rahmen des W VII vor allem Probleme behandelt werden, die durch die mechanisch anisotrope Struktur von Torus mit Helix, sowie durch toroidale Einflüsse entstehen. Da STRUDL für diese Probleme eine Flut von Eingabedaten benötigt, wurde ein umfangreiches Computerprogramm erstellt, das die Eingabedaten "STRUDL-gerecht" ins AMOS schreibt.

4.2.3 Kräfte auf das Gerüst und Beanspruchung des Stützringes.

Zusätzlich zu den unter Pkt. 4.2.1 erläuterten Kraftberechnungen waren zur Vorbereitung der Konstruktion des Gerüsts Abschätzungen nötig in Bezug auf das Torsionsmoment durch die Hauptfeldspulen bei erregtem Vertikal-Feld, die Verhinderung von Bewegungen des Stützringes, sowie die Resonanzfrequenz von Torsionsschwingungen. Berechnet wurden die von den Zentripetal-Kräften je Hauptfeldspule im Stützring hervorgerufenen Normalspannungen, Schubspannungen und Biegemomente.

4.2.4 Magnetische Kräfte und mechanische Beanspruchung im System der Vertikal- und OH-Trafo-Spulen

Mit Hilfe des Programmes FORIND (IPP 4/93) wurden die Kräfte je Spule im genannten Spulensystem bestimmt. Die mechanische Beanspruchung der Trafo-Hauptspule erwies sich als klein.

4.3 Induktivitätsberechnungen

4.3.1 Hauptfeldspulensystem

Mit dem für toroidale Spulensysteme erweiterten Programm FORIND wurden die Selbst- und Wechselinduktivitäten des Spulensystems berechnet. Damit sind dann auch die gespeicherte Energie und die Zeitkonstante des Systems leicht zu ermitteln (siehe Fig. 24 u. 25 im IPP 2/204).

4.3.2 OH-Trafo Spulensystem und Vertikalfeldspulen

Mit dem Programm FORIND wurden die Teilinduktivitäten ermittelt.

5. Einkauf

Mitarbeiter:

E. Elsholz

Aufgabenbereich:

Vorbereitung, Bearbeitung und Überwachung aller kaufmännischen Vorgänge

Die kaufmännischen Arbeiten konzentrieren sich insbesondere auf die zweite Hälfte des Berichtsjahres.

Aufgabenschwerpunkte waren:

- a) Die Hauptfeldspulen-Auftragsvergabe
- b) Der Kauf eines 2,5 MW-Umformersatzes für den Neutralteilcheneinschuß
- c) Die Beschaffung von Rohkupfer für den OH-Trafo, die Vertikalfeldspulen und die Helix.
- d) Die Kontaktaufnahme zu möglichen Herstellern für das Gerüst.

6. Torus und Helix

Mitarbeiter:

K. Freudenberger, H. Goss, H. Häglspurger, H. Ihmann, J. Kolos, H. Kosniowski, K. Naujoks, H. Scheffer, H. Stoll, G. Wulff, R. Zickert.

Aufgabenbereich:

Torus mit Helix

6.1 Konstruktionsarbeiten

6.1.1 Torus

Es wurden mehrere Möglichkeiten zur Herstellung des Torus untersucht:

- a) Gußverfahren
- b) Schmiedeverfahren
- c) Schweißkonstruktion

Alle Varianten wurden mit und ohne integrierte Kühlung konstruktiv betrachtet.

- a) Scheidet möglicherweise aus

Gründe:

Festigkeit nicht erreichbar, vakuumtechnisch untaugliche Oberfläche, gußtechnisch kaum realisierbar.

- b) Scheidet aus

Gründe:

Teuer, so große Hämmer nicht bekannt.

Die Entscheidung fiel vorläufig auf Verfahren c).

Nachdem die Untersuchung einer dauerbetriebsfesten Kühlung gezeigt hat, daß schweißtechnische Schwierigkeiten zu einem etwa doppelten Aufwand führen, ist auf die Kühlung an der Innenwand verzichtet worden.

Nach dem Verfahren c) werden aus Blech gepreßte Halbschalen-Segmente untereinander zu Halbschalen verschweißt, diese nach Innenbearbeitung untereinander zu einem Torus verschweißt und außen bearbeitet. Aus diesem Torus wird eine Segmentscheibe herausgetrennt und konstruktiv so gestaltet, daß sie in diesem Spalt jederzeit montierbar und demontierbar ist. Dieses Zwischenstück trägt auch die azimutale elektrische Isolation des Torus.

6.1.2 Schwarten

Diese Elemente sind aus Teilen zusammengefügte, am Torus befestigte Rippen, die zur Versteifung des Gesamtquerschnitts und zur Führung der Helix nötig sind. Es wurden zwei Varianten konstruktiv untersucht:

- a) Gitterwerk geschweißt
- b) massive Teile mit Torus verstiftet

6.1.3 Bandage

Sie stellt ein über der Helix und den Schwarten liegendes Versteifungselement dar, das ein- oder mehrteilig ausgeführt werden kann und an den Schwarten kraftschlüssig befestigt ist. Betrachtet wurden:

- a) 40 voneinander getrennte Ringe
- b) Torusförmige Ausführung in zwei Hälften, die untereinander und mit den Schwarten verschraubt sind.

Bei einer Entscheidung muß das gesamte Herstellungsverfahren berücksichtigt werden.

6.1.4 Stützen

Die Stützen werden in Unter- und Oberteile getrennt. Die Unterteile sind im Torus vakuumdicht eingeschweißt und ragen nicht über die Bandagen-Außenfläche. Hierfür liegen verschiedene konstruktive Lösungen vor.

6.1.5 Helix

Auf Grund des orthodätischen Stromverlaufs ist ein Verfahren möglich bei dem die Helix aus lauter gleichen, vorgeformten Teillängen aufgebaut werden kann. Zur Verbindung der einzelnen Leiterteillängen wurde Hartlöten als das zuverlässigste Verfahren erkannt.

Die elektrische Verbindung der über dem Zwischenstück liegenden helischen Leiterstücke mit denen vom Torus geschieht durch Weichlötlung. Diese Verbindungsart wurde aus einer Vielzahl von Lösungsvorschlägen ausgewählt, da sie leicht lösbar ist und einen noch relativ guten elektrischen Kontakt gewährleistet. Die einzelnen Helixleiter werden mittels Isolierkeilen in ihrer Lage fixiert. Strom- und Kühlwasseranschlüsse werden z.Z. konstruktiv untersucht.

Die Isolation der Leiter untereinander und zum Torus muß in Zusammenhang mit dem anzuwendenden Herstellungsverfahren der helischen Wicklung betrachtet und entschieden werden.

6.2 Versuche

6.2.1 Lineares Modell M = 1 : 3 (abgeschlossen)

Ermittlung der Verformbarkeit der Leiter und der maximal einlegbaren Leiterlänge. Verformbarkeit gut, einlegbare Länge $\vartheta = 180^\circ$.

6.2.2 Toroidales Modell M = 1 : 4 (in Arbeit)

Verformbarkeit der Leiter am Torus, einlegbare Leiterlänge am Torus, Kontrolle des errechneten Leiterverlaufs, Verkeilung der Leiter untereinander, Heraushebbarkeit aus der Nut zum Löten, Montagestudien.

6.2.3 Lineare Biegeversuche M = 1 : 1 (Extern)

Deformation des Leiterquerschnitts, Kräftebedarf und Rückfederung beim Biegen um den echten Krümmungsradius und beim Tordieren, Ermittlung des günstigsten Härtezustandes des Kupferleiters. Teilergebnisse liegen bereits vor.

6.2.4 Lineare Lötversuche an kurzen Leitern M = 1 : 1 (in Arbeit)

Form der Lötstelle, Lötqualität, mechanische Festigkeit, elektrische Eigenschaften und Wasserdichtigkeit der Lötstelle.

6.2.5 Toroidale Versuche M = 1 : 1 (in Vorbereitung)

Es wurde ein Versuchsprogramm an einem 1 : 1 Modell des Torus erarbeitet. Dieser Versuch soll Auskunft geben über:

Verformbarkeit des Kupferleiters,
toroidale Hartlötversuche,
Weichlötversuche am Zwischenstück,
Bearbeitung der Leiterenden,
Justierbarkeit der Leiter,
Isolationsverfahren,
Herstellung und Befestigung der Schwarten,
Zwischenstückverbindung,
Entwicklung von Fertigungsvorrichtungen (Biegen, Bearbeiten, löten).

Infolge der Aufwendigkeit des Versuchs ist die Durchführung noch nicht entschieden.

6.3 Firmenkontakte

Die Firmen-Verhandlungen werden mit folgender Zielsetzung geführt:

- a) die von uns ausgesuchten Firmen mit den Anforderungen und der mit diesen verbundenen Problematik vertraut zu machen,
- b) Prüfung der Bereitwilligkeit, der technischen Kompetenz und der Werkskapazität für eine funktions- und termingerechte Ausführung dieser Komponente,
- c) um spezielle Techniken und Erfahrungen der einzelnen Firmen in unsere Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit einfließen zu lassen,
- d) um umfassende und detaillierte und mit geringsten Risiken behaftete Angebote zu erhalten.

Darüberhinaus wurden Kontakte aufgenommen zu diversen maschinenbautechnischen Firmen (potentielle Unterlieferanten), um jetzt schon eine Vorauswahl treffen zu können. Bei diesen Verhandlungen wurden bezüglich des Torus folgende Fragen erörtert:

- a) Materialauswahl
- b) Herstellungsverfahren der Halbfabrikate
- c) Bearbeitung, Schweißtechnik, Vakuumtechnik, Permeabilitätsforderung.

Diese Verhandlungen sollen dazu führen, daß fertigungsgerechte Konstruktionen erstellt und die mit den geringsten Risiken behafteten Fertigungsverfahren und Abnahmebedingungen ermittelt werden können.

7. Magnetfeldspulen

Mitarbeiter:

A. Elsner, K. Freudenberger, F.W. Hoffmann, R. Jaenicke, G. Kaspar, P. Krüger,
H. Lohnert, A. Martinelli, B. Streibl, S. Wipf

Aufgabenbereich:

Hauptfeldspulen, Vertikalfeldspulen, Korrekturfeldspulen

7.1 Hauptfeldspulen

7.1.1 Mechanische Beanspruchung

Für die Erzeugung des toroidalen Magnetfeldes sind am Umfang des Torus 40 wassergekühlte Spulen gleichmäßig verteilt angeordnet (Abb. 1 u. Abb.2). Die infolge der toroidalen Anordnung auftretenden Zentripetalkräfte von 206 Mp pro Spule werden vom Stützring des Gerüsts aufgenommen. Durch die Wechselwirkung des Spulenstromes mit dem Vertikalfeld wirken auf die Hauptfeldspulen Kippmomente, die in die Tragringe des Gerüsts eingeleitet werden.

Bei Spiegelexperimenten oder bei Ausfall einer Spule treten in Umfangsrichtung beachtliche Kräfte auf. Z.B. wirken bei Ausfall einer Spule auf die beiden Nachbarspulen Kräfte von je 291 Mp. Durch die Wahl des Leiterprofils (s. Skizze) wird gewährleistet, daß die in der Wicklung entstehenden Axialkräfte über das Gehäuse der Spule in die Gerüstkonstruktion eingeleitet werden. Das verwendete Spulen-Isoliermaterial ist aus thermischen und aus Festigkeitsgründen glasfaserverstärktes Epoxydharz; dieser Werkstoff hat im ausgehärteten Zustand eine höhere Festigkeit als das verwendete Kupfer (SE-CuF25).

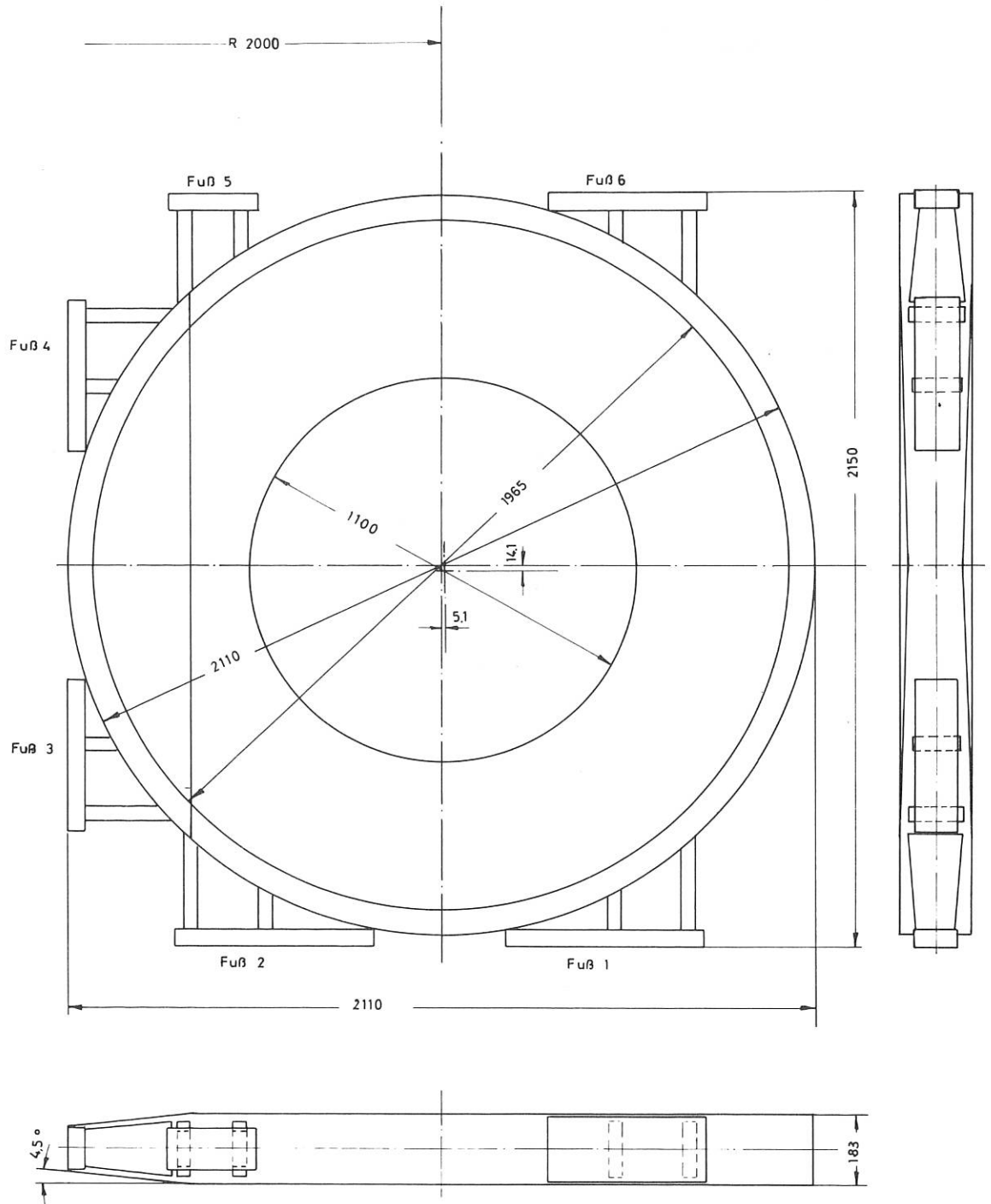


Abb. 2 Hauptfeldspule

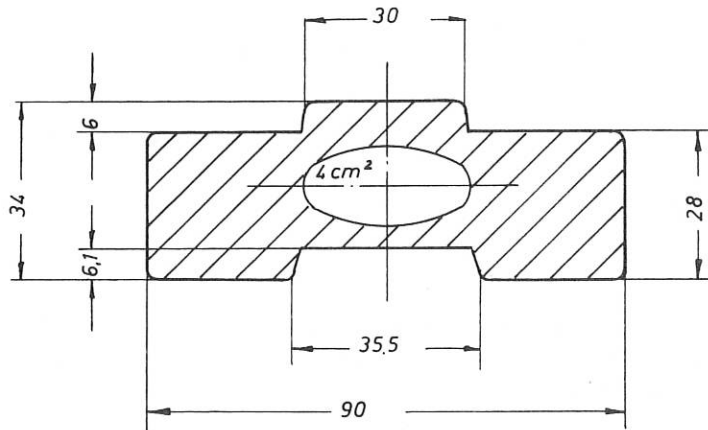


Abb. 3 Leiterprofil der Hauptfeldspule

7.1.2 Daten des Hauptmagnetfeldsystems

a	Anzahl der Spulen	40
b	Anzahl der Windungen pro Spule	25
c	Stromstärke/Windung	40 kA
d	Induktion auf der Torusseese	40 kG
e	Stat. Spannung über eine Spule bei $I=40$ kA	45 V
f	Gespeicherte magn. Energie	135 MJ
g	Gesamte Verlustleistung	72 MW

7.1.3 Schaltung

Sämtliche Spulen werden, zu zwei Gruppen zusammengefaßt, elektrisch in Serie geschaltet. Zur Vermeidung hoher Stromkräfte infolge des möglichen Ausfalles einer der beiden Gruppen wird der gesamte Spulensatz so verschaltet, daß jeweils auf eine Spule der ersten Gruppe eine der zweiten folgt.

7.1.4 Einbaukriterium

Für die Genauigkeit des toroidalen Feldes ist von der Physik her folgende Bedingung zu erfüllen: Eine vom Kreismittelpunkt ausgehende Feldlinie muß nach einem $\varphi=2\pi$ -Umlauf innerhalb eines Kreises mit $r = 1$ mm ankommen. Diese Bedingung setzt ein sehr genaues Ausrichten sowohl jeder der 40 Einzelspulen als auch des gesamten Spulensystems voraus. Bei den Einzelspulen wird die Lage der einzelnen Windungen - und damit die Stromverteilung in der Spule - mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm vermessen. Mit Hilfe der so ermittelten Stromverteilung wird numerisch das Magnetfeld der Einzelspule errechnet, und daraus die Einbaulage jeder Einzelspule ermittelt. Die Vermessung der Störfelder auf elektrischem Wege soll die Überprüfung der Störfeldrechnungen gestatten.

Im toroidalen Feldverlauf dann noch vorhandene integrale Ungenauigkeiten (z.B. infolge eines systematischen Fehlers beim Vermessen der Einzelspulen) werden mit Hilfe der Fadenstrahlmessung und Nachjustieren der Einzelspulen bis auf den zulässigen Restfehler korrigiert.

7.1.5 Sonderspulen

Um den tangentialen Neutralteilcheneinschuß zu ermöglichen, werden zwei Paare von Hauptfeldsonderspulen benötigt. Die technische Klärung dieser Spulen ist noch nicht abgeschlossen.

7.2 Vertikalfeldspulen

Zum Ausgleich der sog. hoop-force des Plasmas werden die Vertikalfeldspulen angebracht (Abb.1).

7.3 Supraleitende Spulen

Der 1970 vom IPP ursprünglich für den W VII bestellte supraleitende Prototypmagnet (lichte Bohrung 80 cm) ist fertiggestellt. (Die Supraleitung wurde beim W VII zugunsten der Normalleitung aufgegeben). Bei der Abnahmeprüfung wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Abkühlung des Magneten mittels 30 W Refrigerator von Raumtemperatur auf Betriebstemperatur 4.3K in 26 h; maximaler Spulenstrom 863 A, hierbei Feld auf der Achse 1.6 T und Maximalfeld an der Wicklung 5.5 T, Auferregungszeit 30 min (bei toroidaler Anordnung von 40 Spulen würde ein Spulenstrom von 630 A ein Zentralfeld von 4 T und ein Maximalfeld von 6.2 T erzeugen).

8. OH - Trafo

Mitarbeiter:

R. Jaenicke, R.C. Kunze, G. Müller, H. Lohnert

Aufgabenbereich:

Einrichtungen zur Ionisation und zur Heizung des Plasmas mittels induzierbar toroidaler elektrischer Felder sowie zur Reinigungsentladung.

8.1 Transformator

In der Gruppe OH-Trafo wurde im Berichtsjahr im wesentlichen die Klärung der technischen Realisierbarkeit der Ohm'schen Heizung weiter vorangetrieben.

Bezüglich der Energieversorgung wurde entschieden, daß dazu der vorhandene Stoßgenerator in der Energiezentrale (entnehmbare Stoßenergie 15 MJ) verwendet werden soll. Damit war die Aufgabe zu lösen, den Heiztransformator so zu bauen, daß er mit dieser gegebenen Energieversorgung unter Beachtung einiger zusätzlicher Randbedingungen eine möglichst große magnetische Flußänderung und damit einen möglichst großen Plasmastrom ermöglichte. Es wurden folgende Ausführungsformen untersucht:

1. Luftspulen, angeordnet in Form einer Rennbahn
2. " , " " " " Garnrolle
3. Eisentransformator

Der Eisentransformator wurde schon bald ausgeschieden, da das Eisen die Stellaratorfelder und sonstige Magnetfelder verzerrt, und er wegen der großen Eisenmenge mit hohen Kosten verbunden ist. Sein großer Vorteil des geringen Energiebedarfes beginnt außerdem bei den benötigten Magnetfeldern von etwa 30 kG an Bedeutung zu verlieren.

Ausführungsform Nr. 1, die noch im Jahresbericht 1971 auf Seite 51 angedeutet ist, wurde zugunsten von Nr. 2 aufgegeben. Diese ist in Abb. 1 dargestellt und wird zunehmend in modernen Tokamaks (Alcator, Frascati) verwendet. Hauptvorteile sind die erheblich bessere Energieausnutzung, die mit 2,9 Vs mehr als die doppelte magnetische Flußänderung erlaubt, und die geringeren Kosten. Nachteilig wirkt sich dagegen aus, daß sich die magnetischen Feldlinien im freien Raum schließen und damit die ganze Umgebung der Apparatur mit Magnetfeld erfüllen.

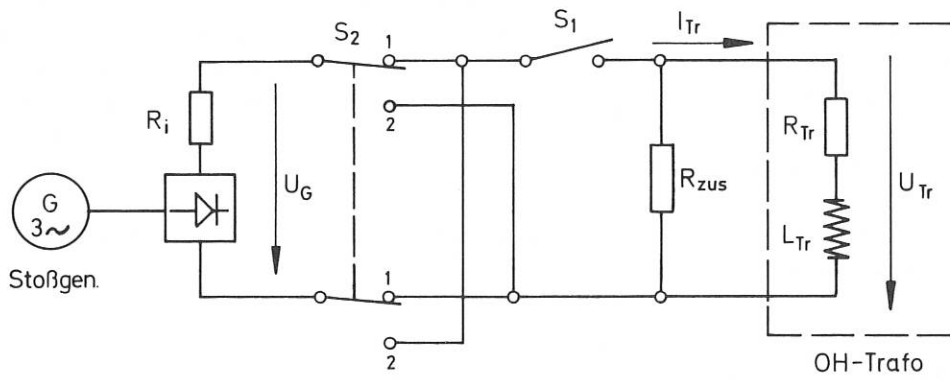
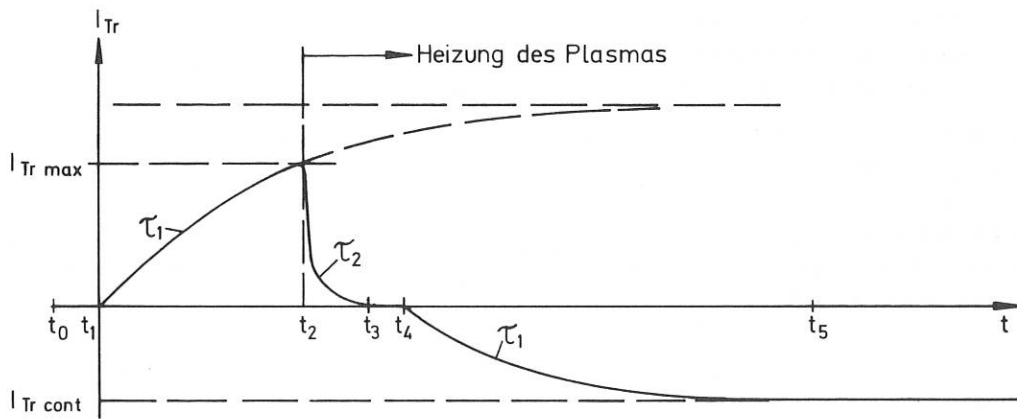


Abb.4 Schaltbild des OH-Transformators



Zur Zeit t_0 Schalter S_1 geöffnet und S_2 in Stellung 1

- | | |
|-------|---------------------|
| t_1 | S_1 zu |
| t_2 | S_1 auf |
| t_3 | S_2 in Stellung 2 |
| t_4 | S_1 zu |

Abb.5 Zeitlicher Verlauf des OH-Transformatorstromes

Das Prinzipschaltbild des Transformators und der zeitliche Verlauf des Transformatorstromes werden in Abb. 4 und Abb. 5 gezeigt. Die Luftspulen werden anfangs als induktiver Energiespeicher verwendet. Durch Öffnen des Schalters S_2 wird die gespeicherte magnetische Energie in kurzer Zeit in dem Widerstand R_{zus} vernichtet und gleichzeitig ein Plasmastrom von maximal etwa 500 kA induziert. Durch eine anschließende Umkehr des Transformatorstromes kann dieser Plasmastrom für etwa 1 sec weitgehend konstant gehalten werden.

Die Konstruktion der Transformatorspulen ist so weit fortgeschritten, daß die Ausschreibung der ersten Spulen begonnen hat.

8.2 Schalter

Der Schalter S_2 (Abb. 4) muß einen Strom von etwa 35 kA gegen eine Spannung von etwa 25 kV unterbrechen. Kommerziell ist kein Schalter erhältlich, der diese Beanspruchung aushält. Als mögliche Lösung für diese Problem wurden in Betracht gezogen:

1. Magnetisch gesteuerte Penning-Niederdruck-Entladung
2. Drehstromleistungsschalter, Kontakte serien- und/oder parallel geschaltet, magnetisch- oder luftgeblasen, mit oder ohne Zwangskommütierung
3. Sehr schnelle mechanische Schalter
z.B. Synchronschalter für Leistungsprüffelder mit Zwangskommütierung
4. Vakuumschalter mit Zwangskommütierung
5. Thyristoren mit Zwangskommütierung
6. Sättigbare Induktivität, eventuell mit Steuerwicklung

Einige der in Frage kommenden Lösungen sind als industrielle Anlagen oder Anlagenteile erhältlich (1,2,3), aber zum Teil in einem noch so frühen Entwicklungsstadium (1,3), daß die Bereitswilligkeit auf die für uns notwendigen Modifikationen einzugehen nur sehr bedingt besteht. Ähnliche Abschaltungen wie die vorliegende werden mit Anlagen nach 4 - 5 ausgeführt, wobei letztere Lösung einen bis zu 10 mal größeren Aufwand bedingt, dafür aber größere Lebensdauer und Schaltfolgefrequenzen aufweist.

Diese und einige andere Gründe scheinen zunächst für den Einsatz von Vakuumschaltern (4) zu sprechen.

Um Schalter auf ihre Eigenschaften prüfen zu können, steht im Bereich der Gruppe Hochspannungstechnik die Einrichtung eines Gleichspannungshochstromanschlusses vom 15 MJ-Stoßgenerator zur Ausführung. Versuche sollen zunächst mit Vakuumschaltern aufgenommen werden.

9. Gerüste

Mitarbeiter:

G. Kaspar, F. Kerl, A. Knallinger, J. Kolos, W. Melchior, P. Meyer, A. Siefert, G. Wulff

Aufgabenbereich:

Gerüste für Hauptfeldspulen, OH-Trafo, Vertikalfeldspulen. Torus mit Helix und Zusatzeinrichtungen.

Die Bemühungen der Gruppe galten im Berichtsjahr dem Hauptgerüst, im folgenden kurz "Gerüst" genannt, das die Hauptfeldspulen, Teile der Vertikalfeldspulen und des OH-Trafo sowie Zusatzeinrichtungen trägt und das diese Komponenten gegen alle Kraftwirkungen sicher abstützen soll.

Die Teile des Gerüsts sind im wesentlichen der obere und der untere Tragring, das Stützrohr das beide Tragringe verbindet und die Fundamentkonstruktion auf der Tragringe und Stützrohr ruhen.

Das Gerüst hat folgende Forderungen zu erfüllen:

1. Es muß die Eigengewichte und die magnetischen Kräfte aller Spulen aufnehmen.
2. Es darf sich unter dem Einfluß der magnetischen Kräfte nur in engen Grenzen elastisch verformen.
3. Es muß weitestgehend unmagnetisch ($\mu_r \leq 1,01$) sein und frei von (induzierten) Azimutalströmen bleiben.
4. Es müssen alle Spulen, der Torus und alle Hilfseinrichtungen im Bereich des Gerüsts in bestimmten Grenzen noch zugänglich sein. Außerdem müssen diese Komponenten mit einem vernünftigen Zeitaufwand montiert, justiert, demontiert und auch ausgetauscht werden können.

Die Forderung nach geringer magnetischer Permeabilität legt nahe, als Werkstoff einen austenitischen Chrom-Nickel-Stahl zu verwenden.

In der Anlaufphase der Gerüstkonstruktion, deren Ende etwa mit dem Ende des Jahres 1972 zusammenfällt, konnte folgendes erreicht werden:

1. Ausgehend vom Torusradius und von den äußeren Spulenabmessungen konnten die Hauptdimensionen des Gerüsts festgelegt werden.
2. Ausgehend von den Spulenkräften und den zulässigen Verformungen des Gerüsts durch diese Spulenkräfte wurden die wichtigsten Wanddicken annähernd ermittelt.
3. Einige brauchbar erscheinende Konstruktionskonzepte für die Hauptteile des Gerüsts wurden erarbeitet.
4. Wünsche und Forderungen für die Befestigung und die Justierbarkeit der Spulen im Gerüst konnten präzisiert und ihre Realisierbarkeit untersucht werden.

Die Gerüstkonstruktion hat damit einen Stand erreicht, der es möglich und erforderlich macht, mit leistungsfähigen Herstellerfirmen weitere Kontakte aufzunehmen.

10. Teilcheneinschuß

Mitarbeiter:

J. Bäumler, J. Eisert, H. Gillhuber, J. Junker, R.C. Kunze, P. Melkus,
F.X. Probst, G. Schilling, E. Speth

Aufgabenbereich:

Injektorsysteme für Neutralteilchen

10.1 Atomstrahl

Eine modifizierte Kopie der 50 mmØ Oak-Ridge-Duo-Pigatron-Ionenquelle wurde gebaut. Die mit dieser Quelle in Oak Ridge erreichten Daten sind: Ionenstrom 4,5 A für 0,1 s bei einer Extraktionsspannung von 37 kV, ca. 60 % hiervon brauchbar als Neutralstrahl gebündelt innerhalb eines

Divergenzwinkels von $\pm 1.5^\circ$. An dem dazu gebauten Hochvakuumpumpstand, 3×30.000 l/s, und mit der Stahldiagnostik, den Sonden, einem Auffangkalorimeter, und einem für den Strahl geeigneten Massenspektrometer, wird diese Teilchenquelle in Betrieb genommen. Dabei sollen mögliche Verbesserungen im Hinblick auf den 10 s Betrieb des W VII untersucht werden.

Für die Ionenbeschleunigung wurde eine regelbare Hochspannungsanlage für 100 kV und 10 A Dauerbetrieb bestellt. Für den Schutz der Ionenquelle wird eine Hochspannungsschnellabschaltung mittels einer Vakuumröhre entwickelt.

In Zusammenarbeit mit der Abteilung Oberflächenphysik wird die Plasma- und Strahl-Wandwechselwirkung bei hoher Auffalldosis auf eine W VII-ähnliche Wand untersucht. Im Rahmen eines gemeinsamen, von EURATOM prioritär geförderten Programms arbeitet die Ionenquelle in Fontenay-aux-Roses an der Erhöhung der thermischen Belastbarkeit der Extraktionsgitter und an neuen Ionenquellenkonzepten, Ringquellen, Schlitzquellen, die am W VII eingesetzt werden können.

10.2 Clusterstrahl

Vorversuche zur Erzeugung eines Clusterstrahles von 100 mA Stromstärke bei einer Beschleunigungsspannung von 1 MV, der einem atomaren Neutralstrahl von 10 A Stromstärke und 1 keV Teilchenenergie bei einem 10^3 -Teilchen-Cluster entspricht, laufen im Institut für Kernverfahrenstechnik in Karlsruhe weiter. Wasserstoff-Clusterionen wurden schon bis zu 150 keV beschleunigt und mit Wasserdampf neutralisiert, die Beschleunigung auf 1 MV wird vorbereitet. Diese Versuche der KfA Karlsruhe werden außer in Karlsruhe auch gemeinsam mit anderen Institutionen im "Institut für Aerobiologie" der Fraunhofer-Gesellschaft in Graftschaff und im "Institut des Physique Nucleaire" in Lyon durchgeführt.

10.3 Einschußgeometrie

Ein Rechenprogramm wurde entwickelt, das einen Blick auf den W VII in jeder gewünschten Lage und aus jeder Perspektive als Zeichnung (Plot) liefert. Dieses dient u.a. zur Untersuchung der optimalen Lage des Einschußkanals am W VII. Eine Lage, optimiert für den größtmöglichen Einschußkanaldurchmesser unter Berücksichtigung der helischen Windungen und Hauptfeldspulen liegt vor. Zwei Paar Sonderhauptfeldspulen wären hierfür notwendig. Die durch diese Sonderspulen verursachte Magnetfeldstörung hat zwar wenig Einfluß auf die Form der nach wie vor vorhandenen magnetischen Oberflächen, bewirkt aber eine Variation der Feldstärke von einigen Prozent des Hauptfeldes über den Bereich der Sonderspulen. Im Hinblick auf die erreichbare Apertur und diese Feldstörung wird eine Kompromißlösung gesucht.

11. Vakuumsysteme

Mitarbeiter:

H. Häglspenger, W. Heiland, J. Junker, W. Poschenrieder

Aufgabenbereich:

Errichtung der Anlagen zur Erzeugung und Messung des Vakuums im Torus

Durch die Anordnung der Hauptfeldspulen und der helischen Wicklungen ist die maximale Pumpgeschwindigkeit am Torus fest vorgegeben. Unter der Annahme von idealen Pumpen ($S = \infty$) ergibt sich für H_2 ein Grenzwert von $S_m = 450 \cdot 10^3$ l/s. Verwendet man diesen Wert zur Bestimmung des

HO-Faktors der gesamten Torusfläche (30 m^2) so erhält man 3.3 %, d.h. ein H_2 Molekül wird im Mittel 30 mal auf die Wand treffen ehe es abgepumpt wird. Damit liegt auch der Wert für das "Recycling" bei >30 . Damit verbunden ist eine hohe Wahrscheinlichkeit für Sekundäreffekte - Desorption und eventuell Zerstäubung - an der Wand. Insgesamt führen diese Effekte zu einem erheblichen Energieverlust im Plasma. Es ist deshalb wünschenswert das Pumpsystem so anzulegen, daß die obigen Werte möglichst wenig verschlechtert werden. Dazu wurden die folgenden Alternativen untersucht.

- a) Verwendung von Öldiffusionspumpen kombiniert mit Rootspumpen und Vorpumpen. Der Vorteil liegt hier in der Fähigkeit, alle Gase etwa gleich gut zu pumpen. Nachteilig sind hier der Aufwand, Ölrückströmung mit Sicherheit zu vermeiden, und vor allem die durch die erforderlichen Zwischenleitungen reduzierten Pumpleitwerte. Pumpgeschwindigkeiten für H_2 von 170 000 l/s dürften das Maximum darstellen. Damit würde sich der Wert für Recycling auf 75 (!) erhöhen.
- b) Kombination von Turbomolekularpumpen (+Roots- und Vorpumpen) mit Orbitronpumpen und Zr-Al Getterpumpen. Neben der Ölfreiheit dieses Systems liegt der Hauptvorteil in der Möglichkeit, die Getterpumpen (Volumengetter) sehr nahe am Torus anzubringen. So könnte die Pumpgeschwindigkeit für H_2 gegenüber (a) verdoppelt werden. Ein Nachteil liegt in der Selektivität der Getterpumpen, Edelgase werden nicht abgepumpt. Die Orbitronpumpen dienen als "Haltepumpen" im UHV-Bereich während längerer Betriebspausen. So können saubere und kontrollierbare Wandbedingungen gewährleistet werden.
- c) Vakuumsystem wie unter (b), doch statt der Volumengetter Kryopumpen. Um H_2 zu pumpen, müssen die Kryoflächen mit 1He gekühlt werden. Hauptvorteil dieses Systems: Beliebig häufige Regenerierbarkeit, alle Gase außer He werden gepumpt. Die Kryoflächen dürfen jedoch das Plasma nicht sehen, da durch energetische Teilchen eine heftige Desorption eintreten kann. Deshalb dürfte die maximale Pumpgeschwindigkeit für H_2 unter der von Alternative (b) liegen.

Eine Entscheidung zwischen den aufgeführten Möglichkeiten wurde bisher nicht getroffen, da noch Detailfragen mit Herstellerfirmen zu klären sind.

Die ursprüngliche Absicht, die gesamte Torusinnenwand als pumpende Fläche zu gestalten, kann innerhalb des laufenden Projekts nicht verwirklicht werden. Abgesehen davon, daß hierfür die technologischen Voraussetzungen noch weitgehend fehlen, würde durch die dazu nötigen Einbauten die Apertur des Torus zu sehr begrenzt.

Als spez. Detailproblem wurden in einer Versuchsreihe Golddraht-Dichtungen untersucht. Zweck der Untersuchung war die Feststellung der zur Erzielung einer einwandfreien Vakuumdichtung erforderlichen Mindestverformung bzw. -kräfte bei Plan- und Eckdichtungen. Die Prüfflansche waren aus gehärtetem Stahl, die Dichtflächen fein geschliffen und poliert (mittlere Rauhtiefe $\leq 0,5 \mu$). Die sich daher ergebende bleibende Verformung des Dichtringes wurde jeweils nach Lösen der Dichtung ermittelt. Vakuumdichtigkeit ($< 10^{-10}$ Torr l/sec) mit den geringsten Verformkräften ergab sich nach Glühen der Dichtringe im Ofen bei 900°C und 10 min Glühdauer. Die dazu erforderliche Mindestpressung lag bei sämtlichen geprüften Dichtringen (1,0 - 1,5 - 2,0 mm \varnothing) bei max. 25 % ihres Ausgangsdurchmessers und folgenden Verformkräften:

Golddraht \varnothing mm	Kraft in kp pro cm Drahtlänge
1,0	107
1,5	217
2,0	231

Für die Herstellung von Eckdichtungen waren ca. 2,5 fach höhere Verformkräfte erforderlich als bei Plandichtungen.

12. Kühlung

Mitarbeiter:

J. Eisert, A. Elsner, H. Schickel

Aufgabenbereich:

W VII-Kühlsysteme und Bereitstellung der Kühlmittel

Vorbereitende Planungsarbeiten für die Kühlsysteme am W VII wurden durchgeführt. Die wesentlichen Komponenten werden wie folgt gekühlt:

	abzuführende Leistung MW	Kühlmittel	Durchsatz m ³ /h	Zulauf- temperatur C
Hauptfeldspulen	1.6	Kühlturmwater	350	25-30
OH-Trafo	0.1	"	5	"
Vertikalfeldspulen	0.1	"	5	"
Torus u. Limiter	0.1	"	50	"
Helix	1	Grundwasser	250	10-12

Das Kühlmittel wird zur Überwindung des Strömungswiderstandes in den Kühlkanälen der einzelnen Systeme mit Druckpumpen eingespeist.

Für Hauptfeldspulen und Helix wurde ein Rechenprogramm erstellt, das die Berechnung der Temperatur längs eines wassergekühlten Stromleiters im gepulsten Betrieb gestattet. Mit einem weiteren Programm wurde die Erwärmung der Toruswand durch Energieabsorption (HF-Heizung, Teilchenbeschuß) berechnet. Die Programme stellen eine numerische Lösung der inhomogenen Wärmeleitungsgleichung mit temperaturabhängigen Koeffizienten dar (Anfangs- und Randwerte werden vorgegeben).

13. Stromversorgung-IPP

Mitarbeiter:

M. Kottmair

Aufgabenbereich:

Bereitstellung aller Stromversorgungseinrichtungen mit Ausnahme der in Abt. E2 installierten Energie-, Steuer- und Meßleitungen zum Experiment.

Die im Jahr 1971 getroffene Entscheidung, das Experiment W VII mit normalleitenden Hauptfeldspulen auszuführen war Anlaß, den ursprünglich zur Versorgung anderer Experimente bestellten Stoßleistungsumformer den Erfordernissen des Experimentes W VII anzupassen. Der Änderungs-Auftrag zur Vergrößerung der Nutzenergie des Maschinensatzes von 144 auf 1450 MJ konnte noch Ende 1971 mit dem Hersteller vereinbart werden.

Die Notwendigkeit der Versorgung von nunmehr zwei Experimenten (W VII u. Pulsator), deren Auf-

stellungsorte rund 200 m voneinander entfernt sind, erforderte die Überprüfung der Standortwahl des Maschinenhauses für den Umformer, das ursprünglich ostwärts der Laborhalle L6 mit möglichst geringem Abstand vom Experiment W VII errichtet werden sollte. Zu berücksichtigen war hierbei vor allem die Leitungsführung für die Versorgungseinrichtungen zwischen Maschinenhaus und Experimenten, die für eine Kurzzeitleistung von 155 MW zu bemessen sind. Aber auch die Forderungen der Baubehörden (Landschaftsschutz) und die Tatsache, daß zur Aufstellung künftiger, aus dem Umformer zu versorgender Großexperimente das Vorbehaltsgelände im Süden des Institutsareals vorgesehen ist, mußten Beachtung finden. Die Berücksichtigung dieser Forderungen führte zur Wahl des Maschinenhausstandortes neben der Energiezentrale.

Der Leistungsbedarf des Maschinensatzes von 7,5 MW für den Antrieb und ca. 0,8 MVA für Hilfsbetriebe überfordert die Leistungsfähigkeit der bestehenden elektrischen Anlagen des Institutes von insgesamt 8 MVA (derzeitiger Maximalleistungsbedarf ca. 5 MVA). Die Isar-Amperwerke errichten deshalb im Umspannwerk Garching ein weiteres 10 kV-Umspannfeld mit 16 MVA Nennleistung, das dem IPP ab Februar 1974 zur Verfügung stehen wird. Die Kabelverbindung zwischen UW Garching und IPP, die erforderliche 10 kV-Schaltanlage, sowie die Gleichstromleitungen vom Maschinenhaus zu den Laborgebäuden L6 und L7 wurden im Berichtsjahr in Auftrag gegeben.

14. Stromversorgung E2

Mitarbeiter:

K. Freudenberger

Aufgabenbereich:

W VII-bezogener Aufbau und Erweiterung der in der Abt. E2 vorhandenen Stromversorgungseinrichtungen. Schalter für alle Stromversorgungssysteme.

Im Hinblick auf die Fertigstellung des W VII wurde im Berichtsjahr die Stromversorgung - sowohl die des Experimentes als auch die der allgemeinen Einrichtungen in L7 - weiter ausgebaut.

Ein Kreuzschieneverteiler mit 1500 Schaltpunkten wurde im Keller von L7 aufgebaut; das Anschließen der Generatoren an diesen - zumindest der größeren - im L3E ist in vollem Gange. Der Kreuzschieneverteiler dient der Aufgabe die Gleichstromquellen in L3E an die verschiedenen Magnetfeldspulen (Vertikalfeld, Zusatz- und evt. Korrekturfelder) des W VII anschließen zu können.

Für die Versorgung des Neutralteilchen-Einschusses am W VII wurde ein Umformersatz angeschafft - Drehstrommotor/Drehstromgenerator - der eine dreiphasige Wechselspannung einstellbar von 0 ... 525 V für den Hochspannungsteil der Ionenquelle liefert. Der konstruktive Teil (Grundrahmen, Fundament, Kühlung, Ölversorgung) für dessen Aufstellung ist abgeschlossen.

Mit den Arbeiten für die Umschaltung der Generatoren im L3E von L3 nach L7 wurde begonnen; die "Wechselschalter" für 4000 A und 2000 A sind vorhanden und werden in der nächsten Zeit montiert. Für die Versorgung der Vertikalfeldspulen werden in der stationären Phase des Experimentes zwei "Herta-Maschinen" benötigt. Für Zusatzfelder eventuell noch andere Stromquellen.

15. Steuerung und Überwachung

Mitarbeiter:

H. Holitzner, W. Jakobus, P. Schwarz, M. Zippe

Aufgabenbereich:

Steuerungs- und Überwachungseinrichtungen sowie der Einrichtungen zur Registrierung wesentlicher Betriebsparameter.

Im Berichtszeitraum lag das Schwergewicht der Tätigkeit auf der Projektdefinition und der Klärung von Grundsatzfragen. Es wurde entschieden, das Überwachungssystem des Gesamtexperimentes zu dezentralisieren, d.h. allen technisch selbständigen Teilsystemen eigene Überwachungs- und Sicherheitseinrichtungen zuzuordnen. Eine Betriebszentrale zur Auswertung summarischer Zustandsmeldungen der Teilsysteme und zu ihrer sicherheitstechnischen Verknüpfung wurde konzipiert. Von hier aus erfolgt auch die Steuerung des technischen Betriebsablaufs. Es wurden Formate für Steuerbefehle und Meldungen festgelegt. Weiter wurde der Prototyp einer Zeitablaufsteueranlage mit max. 256 Kanälen und einer Zeitauflösung von $1\mu\text{s}$ entwickelt. Der Datentransfer ist kompatibel mit dem in der PDP-11-Rechenanlage verwendeten UNIBUS-System. Ebenfalls in der Betriebszentrale soll die Registrierung aller technischen Betriebsparameter erfolgen, es wurden mehrere alternative Konzepte hierfür entworfen. Für den zu entwickelnden digitalen Großstromregler zur Regelung des helischen Feldes wurden Voruntersuchungen über schnelle Leistungsschalter aufgenommen, die endgültige Lösung wird von der Forderung an die Regelgeschwindigkeit bestimmt.

Schwerpunkt der kommenden Arbeit wird die Detailplanung und der Bau der Betriebszentrale unter Berücksichtigung der laufenden Fertigstellung der Gesamtanlage sein. Die z.Z. mit 16 Kanälen ausgebaute Zeitablaufsteuerung wird am Experiment W IIb erprobt, insbesondere müssen Werte über die zulässige Störeinstrahlung gewonnen werden. Eine kleinere Version des Großstromreglers wird ebenfalls am W IIb erprobt.

16. Diagnostik

Mitarbeiter:

H. Brinkschulte, C.O.L. Juulmann, H. Ringler, E. Würsching

Aufgabenbereich:

Diagnostische Einrichtungen

Die Vorbereitungen für die Diagnostik am W VII bestanden im Berichtsjahr im wesentlichen aus Überlegungen möglicher Diagnostikverfahren. An Arbeiten, die darüber hinausgehen, seien die Mikrowellen- und Laserdiagnostik erwähnt, die zum Teil am W IIb im Hinblick auf den späteren Einsatz am W VII erprobt werden. Diese Verfahren werden an anderen Stellen dieses Jahresberichtes beschrieben (siehe Abt. E2).

Ferner wurden Überlegungen durchgeführt über apparative Voraussetzungen für die spektroskopische Diagnostik sowie über erforderliche Entwicklungsarbeiten. Der Kauf eines Modell 225-T McPherson Vakuummonochromators vom herkömmlichen Typ für den Wellenlängenbereich 30 - 600nm wurde beschlossen. Die Lieferung des Geräts erfolgte noch kurz vor Jahresende.

17. Datenerfassung

Mitarbeiter:

H. Krikava, D. Zimmermann

Aufgabenbereich:

Erstellung aller für den Experimentierbetrieb erforderlichen rechnerorientierten Einrichtungen.

Ein ähnliches Datenerfassungssystem wie es beim Experiment W VII zur Anwendung kommen wird, ist für die gegenwärtigen Wendelstein-Experimente im Aufbau. Diese Anlage ist aufwärtskompatibel. Wegen der rapiden Entwicklung auf dem Gebiet der Computer und der rechnergesteuerten Elektronik sollte die Anschaffung dieses Datenerfassungssystems möglichst weit hinausgezögert werden. Es ist abzusehen, daß zusätzliche Aufgaben der Steuer- und Regeltechnik auf den Rechner zukommen werden, der in der ersten Ausbaustufe nur für Datenerfassung konzipiert ist.

Bei der Planung des Wendelstein W VII hat die Gruppe Datenerfassung durch Fachgespräche und Diskussionen, speziell mit den Gruppen Steuer- und Regelungstechnik und Diagnostik, mitgewirkt.

18. Theorie

Mitarbeiter:

P. Barberio-Corsetti, S. Rehker, H. Wobig

Aufgabenbereich:

Beeinflussung des Projekts in der Aufbauphase durch neue theoretische Erkenntnisse.

Im abgelaufenen Berichtsjahr wurden im Rahmen des Projekts W VII folgende Probleme bearbeitet:

- a) Einfluß der kalten Neutralgasschicht auf die Energiebilanz des W VII. Die diffuse Reflexion erhöht die Neutraldichte um den Faktor 2 - 3, dadurch erhöht sich auch der Energieverlust durch Ladungsaustausch.
- b) Berechnung der Zyklotronstrahlung des W VII. Ohne Selbstabsorption ergibt sich eine Verlustleistung von 40 kW; da aber die erste und zweite Harmonische optisch tief sind, wird der größte Teil der Strahlung wieder absorbiert.
- c) Einfluß von Störfeldern auf das Magnetfeld des W VII. Aus Verschiebungen der magnetischen Fläche wurden Toleranzen für Störfelder, die sich aus Lageänderungen des Hauptfeldspulensystems ergeben, abgeleitet.
- d) Ohm'sche Heizung nach dem Düchs-Code. In Zusammenarbeit mit Herrn Düchs (Abt. Theorie) wurde die Aufheizung im W VII unter verschiedenen Anfangs- und Randbedingungen numerisch berechnet. Unter der Annahme der pseudo-klassischen Diffusion ergaben sich bei einem Heizstrom von 200 kA Temperaturen von $T = 1$ keV. Rezirkulierendes Neutralgas wurde dabei berücksichtigt.
- e) Geometrische Probleme der Helix. Es wurden Formeln aufgestellt, die die Geometrie der Helix aus der Forderung nach gleichem Abstand aller Leiter zueinander beschreibt. Näherungsformeln für die Induktivität der Helix wurden abgeleitet.

19. Sicherheit

Mitarbeiter:

M. Hüls

Aufgabenbereich:

Beratung und Mitarbeit in allen Fragen der Arbeitssicherheit, des Strahlen- und Feuerschutzes.

Während des Berichtszeitraumes bestand die Tätigkeit dieser Gruppe im wesentlichen in der Bearbeitung allgemeiner Sicherheitsfragen. Aufgaben ergaben sich im Zusammenhang mit der Wasserstoff-Abgasleitung der Neutralteilchen-Injektion. Hierbei wurden im Beisein technischer Beamter des Unfallverhütungsdienstes der Berufsgenossenschaft und der Gewerbeaufsicht Sicherheitsmaßnahmen für den Aufbau und den Betrieb dieser Anlage behandelt.

EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 3

(Dr. G. von Gierke)

Das Hauptexperiment der Abteilung 3 ist das Tokamak-Experiment Pulsator I. Daneben liefen nur unterstützende Experimente und einige von der Abteilung 3 noch betreute Untersuchungen.

1. Experiment Pulsator1.1. Aufbau der Pulsator-Anlage

(R. Allgeyer, O. Klüber, K. Sahner, J. Stadlbauer)

Zu Anfang des Jahres wurde die Fertigung der Komponenten in der Zentralwerkstatt abgeschlossen. Die dann beginnende Montage umfaßte die folgenden Etappen:

a) Liner:

Die vier mit Induktionsspulen zur Messung der Position der Plasmasäule (sog. Mirnov-Sonden) bestückten Linerteile wurden in je 2 V2A-Gefäßsegmente eingeführt (Abb. 1); diese wurden an der elektrischen Trennstelle vakuumdicht verschraubt.

Der Liner wird gegen das V2A-Gefäß mit Oxydkeramikstützen fixiert. In dem Zwischenraum wird das Mantelvakuum erzeugt.

Liner: Wandstärke 0,3 mm, Wellhöhe 16 mm, Wellabstand 10 mm, innerer Durchmesser 280 mm, elektrischer Gesamtwiderstand 26,4 m Ω , Material Werkst. Nr. 4541.

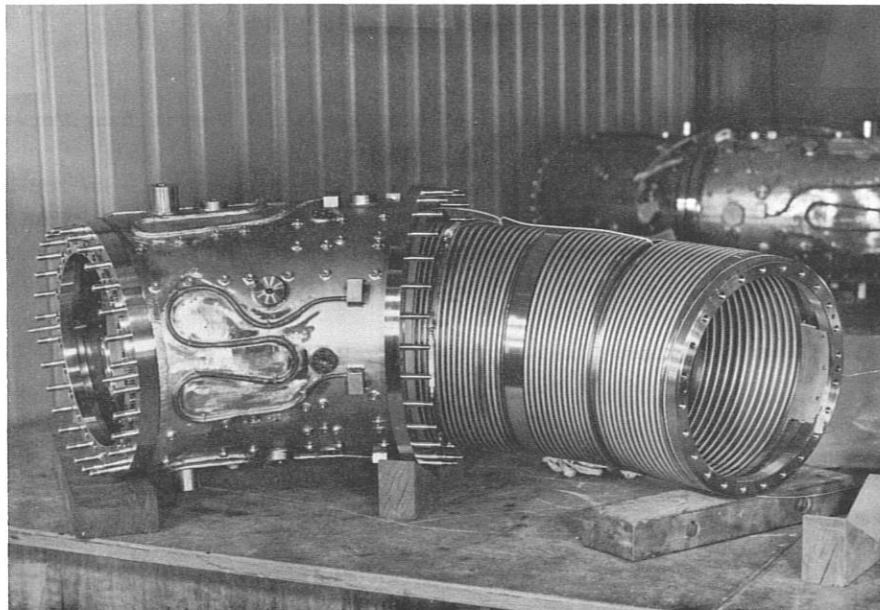


Abb. 1 Inneres Vakuumgefäß ("liner") mit umgebendem Stahlmantel

b) V2A-Gefäß:

Die 4 Mantelteile mit eingebautem Liner wurden mit den Kreuzstücken (sie enthalten die Diagnostik- und Pumpöffnungen) nach vorherigem Auffädeln der Ausheizspule hochvakuumdicht verschraubt. In die Kreuzstücke wurden bereits vor dem Zusammenbau meridionale Sonden, Vorionisierungsspulen, Mikrowellenhörner, sowie eine Rogowski-Spule eingebaut.

Anschließend fand der erste Vakuum- und Ausheizversuch bis 200°C statt. Es traten keine Lecks auf. Beim Ausheizen des Liners blieb die Temperatur des Stahltorus unter der zulässigen Grenze. Nach Wiederöffnung des Gefäßes und Entfernung der Ausheizspule wurde der Torus für das Aufbringen der Stellarator- und inneren Vertikalfeldwindungen abermals geschlossen (s. dazu 1.2.2.). Abb. 2 zeigt den Torus mit diesen Wicklungen.

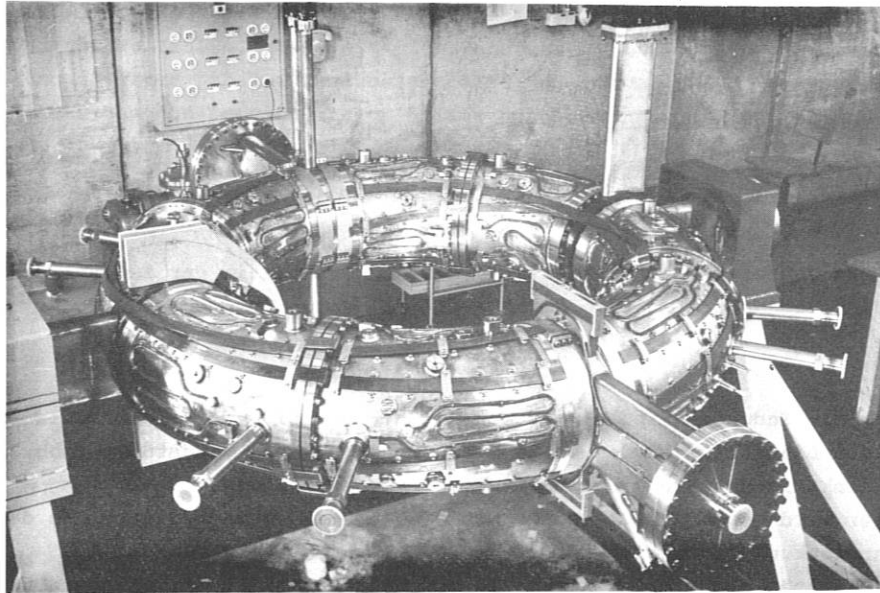


Abb. 2 Stahltorus mit Kreuzstücken für Diagnostik- und Pumpöffnungen und aufgebrauchten Vertikalfeld- und Stellaratorwindungen (noch nicht isoliert)

Für Montage und Demontage des Torus findet eine spezielle Vorrichtung Verwendung.

Trotz der verbreiteten Meinung, das "Conflat-System" würde nur bis NW 200 hinreichend abdichten, wurde nach Vorversuchen bei dieser Apparatur das "Conflat-Dichtprinzip" erstmalig auch über NW 200 verwendet. (10 Ausheizzyklen auf 450°C , bei einem Dichtring von 300 mm \varnothing)

Die Vorteile dieser Schneiden-Dichtung gegenüber Golddraht sind:

- a) ca. 1/3 Flanschpreßdruck (ca. 400 kp, pro 1 cm Dichtungslänge gegenüber Golddraht mit 1,5 mm \varnothing , auf \varnothing 0,7 mm gepreßt = 1200-1300 kp)
- b) kleinere Flanschstärken
- c) genaue Baulängen, da definierte Flanschauflage
- d) wesentlich einfachere Montage bzw. Demontage.

Um eine ausreichende Vorspannung bei den Flanschen zu gewährleisten (erforderlich wegen einer eventuellen Gefäßbewegung durch Entladung), wurden hochfeste Schrauben aus Amanox 183 M9 warm-kalt-verformt verwendet (Mindeststreckgrenze ca. 90 kp/mm^2).

V2A-Gefäß: Großer mittlerer Radius 700 mm, kleiner äußerer Radius 175 mm, Wandstärke 8 mm, Material Werkst. Nr. 3991, Wasserkühlung: Cu-Rohr \varnothing 6 x 0,5 und Gesamtlänge ca. 32 m.

c) Kupfer-Mantel:

Nach Aufbringung verschiedener Meßeinrichtungen (z. B. Thermofühler, Dehnungsmeßstreifen, Diamagnetische Schleife) auf dem V2A-Torus wurden die Segmente des Kupfer-Mantels anmontiert (Abb. 3). Der in sich stabile Cu-Mantel wurde an 42 Stellen isoliert mit dem V2A-Torus verbunden.

Cu-Mantel: Großer mittlerer Radius 700 mm, kleiner äußerer Radius 220 mm, Wandstärke 25 mm, 4 meridionale Isolierschlitze, 1 äquatorial verlaufender Isolierschlitz auf der Außenseite.

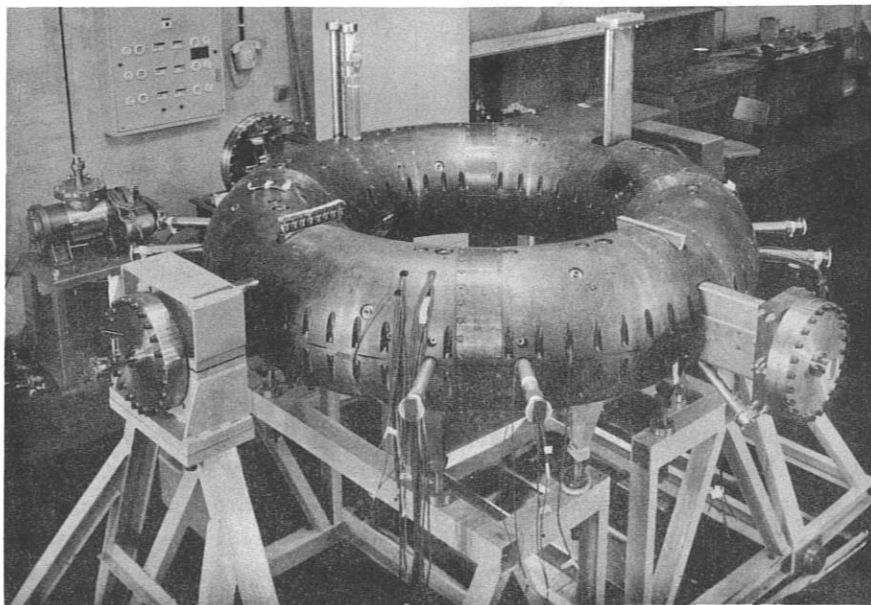


Abb. 3 Kupfermantel zusammengebaut

d) Prüfen und Einbau der Hauptfeldspulen:

Die uns gelieferten Hauptfeldspulen wurden einem Belastungstest unterzogen, bei dem die zum Toruszentrum gerichtete Radialkraft simuliert wurde. Da die Spulen der Belastung nicht standhielten, mußten ihre Halterungen durch einen zusätzlichen Stahlrahmen verstärkt werden.

Nach Trennen des Vakuumgefäßes und des Kupfermantels wurden die verstärkten 48 Hauptfeldspulen aufgefädelt und nach dem Wiederverschließen in die richtige Lage gebracht. Zwischenkeile, die zur Abstützung der Hauptfeldspulen dienen, wurden schon vorher in einem speziellen Gestell paßgerecht eintuschiert.

e) Endmontage:

Nach Fertigstellung der unteren Gerüstplatte und deren sämtlichen Einbauten, vor allem der Transformator- und der verschiedenen Zusatzwicklungen (vgl. dazu Bericht der Abteilung

Technik), wurde diese auf das Endmontagegerüst gebracht und die Apparatur nach vorherigem Einsetzen der Zwischenkeile eingebaut. Wasseranschlüsse, sowie diverse Stromverbindungen usw. wurden gemeinsam mit der Abteilung Technik montiert.

Am 7. 12. 1972 wurde die Apparatur in den Trafo eingefahren (Abb. 4).

Nach Fertigstellung und Verbindung der Vakuumleitungen wurde ein weiterer Vakuumtest (Haupt- und Mantelvakuum) durchgeführt, wobei keinerlei Lecks gefunden wurden.

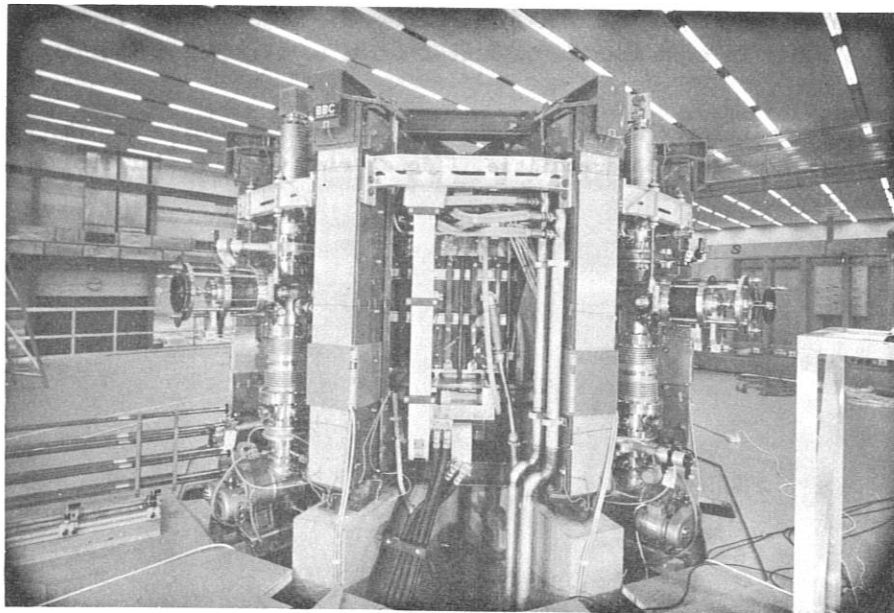


Abb. 4 Gesamtansicht Pulsator

1.2. Spezielle Entwicklungen für Pulsator

1.2.1. Vakuumsystem

(G. Venus, J. Stadlbauer)

Abschätzungen haben gezeigt, daß der unter 1.1. a) beschriebene Liner sehr wahrscheinlich selbst bei einer Temperatur von 400°C einem Außendruck von 1 atm widerstehen könnte. Trotzdem wurde aus Sicherheitsgründen ein Mantelvakuumssystem vorgesehen, welches den Liner vom Außendruck entlastet. Das Mantelvakuumgefäß ist ein V2A-Torus, der an 4 Stellen längs des großen Umfangs elektrisch isoliert ist und der in der Lage ist, den inneren Vertikalfeldwindungen, den helischen Wicklungen und der Kupferschale mechanischen Halt zu bieten (vgl. Abb. 1).

Die Vakuumanlage des Pulsator I besteht also aus einem Hauptvakuumssystem und einem Mantelvakuumssystem. Weiterhin sind noch drei Hilfsvakuumssysteme vorgesehen an Stellen, die mit dem Hauptvakuumssystem des Pulsator zwar verbunden sind, die jedoch apparativ bedingt von dorthin schlecht evakuiert werden können (Hilfsvakuumpumpstand "Limiterschleuse" und "Röntgendiagnostik") oder an Diagnostikapparaturen, die ein selbständiges Vakuumssystem benötigen (Hilfsvakuumpumpstand "Neutralteilchendiagnostik").

1) Pumpsätze für das Hauptvakuum

Zur Evakuierung des Torus (Volumen ca. 300 l, Oberfläche ca. 10 m^2) dienen die Hauptvakuumpumpsätze 1-3 (siehe Abb. 5). Sie haben einen im wesentlichen gleichen Aufbau: Vorpumpe (Duo 35, Saugleistung 10 l/sec), Turbomolekularpumpe (TVP 900, Saugleistung 250 l/sec) und Ionengetterpumpe (NRC 206, Saugleistung für reaktive Gase ca. 800 l/sec, für Edelgase ca. 30 l/sec) ergeben über die Auspumpöffnungen im interessierenden Druckbereich je etwa 300 l/sec Saugleistung. Die Pumpen lassen sich über je einen Pendelschieber (VAT NW 150) vom Rezipienten trennen. An jedem Hauptvakuumpumpsatz kann der Druck über ein Ionisationsmanometer (am PS 1 und PS 2 Veeco RG 84, am PS 3 Varian 971-1008 mit UHV- und Millitorr-Meßröhre und automatischen Bereichsumschaltung) gemessen werden. Die Millitorr-Meßröhre am Pumpsatz 3 ist zur Messung des Fülldrucks in einem Bereich von 10^{-5} bis 1 Torr geeignet.

Die Dichtungen des Entladungsgefäßes wurden - hauptsächlich der thermischen Belastung beim Ausheizen und insbesondere während des Experimentierens wegen - als Kupferdichtung (Conflat-System) ausgeführt. (Siehe dazu 1.1.)

Um gegebenenfalls einen Enddruck von 10^{-8} Torr im Entladungsgefäß erzielen zu können, wurden auch alle anderen Dichtungen im Hauptvakuumsystem als Conflat-Kupferdichtungen ausgeführt, um optimale Dichtigkeit und Ausheizfestigkeit (400°C) zu erreichen. Die zur Zeit in den Torus eingebrachten Komponenten aus organischem Material (Drahtisolation, Gummidichtungen an Fenstern usw.) reduzieren die mögliche Ausheiztemperatur auf $< 200^\circ \text{C}$ und erhöhen die zu erwartenden Abgasraten, so daß mit der Apparatur in ihrer jetzigen Bestückung ein Enddruck von 10^{-7} Torr erwartet werden kann.

Der Gaseinlaß befindet sich am Pumpsatz 2. Die Gasfüllung des Pulsators soll automatisch nach einem Expansionsverfahren eingebracht werden. Ein dazu geeignetes Ventil wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung Technik entwickelt (Häglspurger, Scherzer Jahresber. 71). Darüberhinaus ist ein Durchströmungsbetrieb möglich. Da dabei, um einen Druckabfall längs des Entladungsgefäßes zu vermeiden, relativ kleine Gasmengen durchgesetzt werden müssen, ist die Möglichkeit einer Saugleistungs-drosselung am Pumpsatz 1 (Ventil V 15) vorhanden. Die Pumpsätze und der Torus können während der Betriebspausen mit Argon oder Stickstoff befüllt werden.

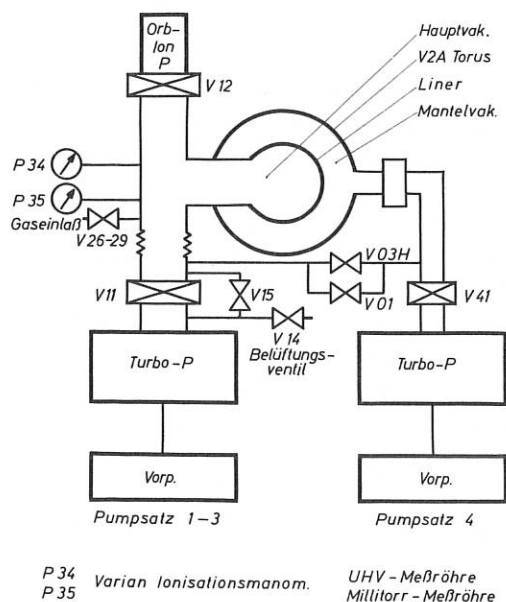


Abb. 5 Schema des Vakuumsystems für Pulsator

2) Mantelvakuumpumpsatz

Zur Vermeidung parasitärer Entladungen innerhalb des Mantelvakuumsystems sollte der Druck in jeder der vier Mantelvakuumszellen im Bereich von 10^{-5} Torr liegen. Das Mantelvakuum wird erzeugt von einer Turbomolekularpumpe (TVP 250, Saugleistung 70 l/sec) und einer Vorpumpe (RZ 12, Saugleistung 3 l/sec). Durch einen Pendelschieber (VAT NW 100) sind die vier Mantelvakuumszellen gemeinsam von der Pumpe abtrennbar. Die vier Isolierstücke in den Mantelvakuumpumpleitungen verhindern ein Überbrücken der Trennstellen im V2A-Torus.

Zwischen dem Hauptvakuumssystem und dem Mantelvakuumsystem besteht eine Verbindungsleitung (siehe auch Bild PS 1). Diese wird für den Fall, daß der Mantelvakuumdruck den des Hauptvakuum um 100 Torr übertrifft, automatisch geöffnet (Ventil VO1 an PS 1). Als zweite Sicherheitseinrichtung ist eine Berstmembran (VO2 an PS 1) vorgesehen, die bei einem Differenzdruck von 400 Torr schaltet (entstanden in Zusammenarbeit mit der Abteilung Technik, H. Häglsperger, H. Scherzer, Jahresber. 71). Es ist klar, daß diese Sicherheitseinrichtungen nur bei langsam ansteigenden Drucken Schutz bieten. Bei massiven Lufteinbrüchen in das Mantelvakuumssystem vollzieht sich die Belüftung über diese Ausgleichsleitung zu langsam ($\text{Zeitkonstante} = \frac{\text{Volumen des Systems}}{\text{Leitwert d. Ausgleichsleitung}}$). Der Liner muß daher wenigstens kurzzeitig dem Atmosphärendruck standhalten. Der Druck im Mantelvakuumssystem wird mit einem Ionisationsmanometer (Veeco RG 84) gemessen. Der Pumpsatz kann während der Betriebspausen mit Argon oder Stickstoff belüftet werden.

3) Hilfsvakuumpumpsätze

Für die Limiterschleuse und bei Bedarf auch für die Blendenrohre, die für die Thomsonstreuung benötigt werden, sowie für die Apparaturen zur Röntgendiagnostik, sind wegen der kleinen Querschnitte, mit denen diese Apparate an das Hauptvakuumssystem des Pulsators angeschlossen sind und wegen der höheren Leckraten, die in diesen Apparaten zu erwarten sind, Hilfsvakuumpumpsätze eingesetzt (Pumpsatz 5, 6). Diese Pumpsätze gleichen im wesentlichen dem Mantelvakuumpumpsatz. Auch die Apparatur für die Neutralteilchendiagnostik hat einen eigenen Turbomolekularpumpstand (TVS 900, Hochvakuumsaugleistung 250 l/sec).

4) Steuerung der Vakuumanlage

(in Zusammenarbeit mit H. Hohenöcker, R. Lathe, D. Zimmermann, F. Hofmeister)

Die Steuerung der Vakuumanlage erfolgt entweder über

- 1) die automatische Steuerung
 - a) Computer-gesteuert
 - b) autonome Notsteuerung
- 2) die Handsteuerung

Die Computer-Steuerung (1 a) überwacht die gesamte Vakuumanlage, führt bei Störungen sinnvolle Maßnahmen durch, die darauf hinauslaufen, das Vakuum im System unter den gegebenen Bedingungen möglichst lange zu erhalten und faßt bestimmte, immer wiederkehrende Abläufe zu Programmen zusammen (Anlaufen der Pumpsätze, Abschalten der Pumpsätze ohne Belüften, Abschalten der Pumpsätze mit Belüften, Experimentieren (Vorbereitung zur Entladung) mit fester Füllung, Experimentieren im durchströmenden Betrieb, Puls-cleaning, Ausheizen usw.), die im Endausbau vom Experimentator durch Knopfdruck gewählt werden können.

Die Notsteuerung (1 b) ersetzt den Computer im Störfall, allerdings nur so, daß das gesamte Vakuumssystem beim Auftreten auch nur einer einzigen weiteren Störung abgeschaltet und belüftet wird.

Es ist bei der Vielzahl der zu überwachenden Parameter und der Kompliziertheit der sinnvollen Antworten auf eine Störung nicht vernünftig, eine Zwischenlösung zwischen der automatischen Computersteuerung und der Handsteuerung, bei der alle überhaupt möglichen Schaltungen durchführbar sein müssen, einzuführen. Diese Aufteilung in vollautomatische Steuerung einerseits und komplette Handsteuerung andererseits wird auch dadurch ermöglicht, daß mit Ausnahme des Kühlwasserausfalls und Phasenausfalls - die in jedem Falle überwacht werden - dank der Auswahl der eingesetzten Vakuumkomponenten eine Fehlbedienung der Anlage oder Teile von ihr nach Herstellerangaben nicht zur Zerstörung der einzelnen Elemente führt. Lediglich eine wiederholte oder lang andauernde Fehlbedienung oder Störung gefährdet die jeweils betroffenen Komponenten (z. B. Laufen der Turbopumpen unter Atmosphärendruck, Betätigen eines Pendelschiebers unter hohem Differenzdruck usw.).

Die Forderung nach einer sinnvollen Antwort der Steuerung im Störfall kompliziert die Steuerung und macht die Überwachung einer Vielzahl von Parametern nötig. Es werden in unserer Anlage überwacht:

- 1) Kühlwasser für Turbo- und Ionengetterpumpen
- 2) Phasenausfall und Unsymmetrie des Stromverbrauchs bei Drehstromverbrauchern
- 3) Pressluftausfall
- 4) Druck im Hochvakuum- und Vorvakuumteil der Hauptvakuum-, des Mantelvakuum- und der Hilfsvakuumpumpsätze
- 5) Differenzdruck zwischen Hauptvakuum und Mantelvakuum
- 6) Ausheiztemperatur des Liners
- 7) Ventilstellungen
- 8) Differenzdruck über geschlossenen Ventilen

Der Hilfspumpstand für die Neutralteilchendiagnostik ist mit der Steuerung der gesamten Vakuumanlage nur lose verbunden, da das Vakuumsystem für den Neutralteilchenanalysator unabhängig von dem des Pulsator steuerbar sein muß (Testen des Neutralteilchenanalysators usw.).

1.2.2. Montage der inneren Vertikalfeldwicklungen und der helischen Wicklungen

(J. Gernhardt, K. Sahner)

Die Vorversuche zur Bestimmung der geeigneten Isolierung wurden im Jahre 1971 abgeschlossen. Die Isolierung der Wicklung (Flachkupfer $30 \times 4 = 120 \text{ mm}^2$) mit einem Glasseidenschlauch und Tränken mit Siliconharz hat sich als zweckmäßig erwiesen. Temperaturen bis zu 250°C wurden von diesem Isoliermaterial nach dem Aushärten ausgehalten. Beim Ausheizen des Liners bzw. bei Belastung der Windungen wird der Stahltorus gekühlt.

Bei der Montage der Wicklungen durch die mechanische Werkstatt der Abteilung E 3 waren folgende Forderungen zu erfüllen:

- 1) Die Einbauhöhe zwischen dem Edelstahltorus und der Kupferschale war kleiner als 20 mm. Das bedeutete besonders für die Kreuzungen zwischen den Vertikalfeld- und den Stellartorwicklungen große Schwierigkeiten.

- 2) Die Stärke der Isolation jeder Wicklung sollte ca. 1 mm betragen.
- 3) Die Flächenpressung von dem isolierten Leiter und den Befestigungspunkten sollte möglichst klein gehalten werden. Zu diesem Zweck wurden 5 mm starke Siliconhartgeweblplatten verwendet.
- 4) Die einzelnen Wicklungen wurden mit 3 mm starkem Edelstahlblech abgedeckt, um die Kräfte von max. 900 N pro cm Wicklungslänge aufnehmen zu können.
- 5) An den Diagnostiköffnungen mußten lösbare Verbindungen der Wicklungen für Montagezwecke vorgesehen werden. Aus Platzgründen könnten pro Stromübergang nur 2 Schrauben MS x 30 verwendet werden. Um einen erhöhten Kontaktdruck während des Stromübergangs zu erzielen, wurden Gabelkontakte eingebaut. (Zwei parallele Stromführungen) Durch diese Anordnung entsteht bei Stromdurchgang von 30 kA eine zusätzliche Kontaktkraft von ca. 500 N. Die Gewindelänge der A 2-Schrauben wurde möglichst lang gewählt (30 mm), damit der Federweg bei dem Anzugsmoment der Schraube von 6,5 Nm lang ist. Ein nachträgliches Anziehen ist nach dem Einbau in das Experiment nicht mehr möglich. Um die Vorspannkraft möglichst groß zu halten, wurden die Schrauben mit einem Gleitmittel behandelt (Vorspannkraft 700 N).
- 6) Die Wicklungen und die Abdeckbleche aus Edelstahl mußten dreidimensional gebogen werden. Dazu waren mehrere Vorrichtungen notwendig. Besonders schwierig waren die Kreuzungen der inneren Vertikalfeldwicklungen mit den helischen Wicklungen zu fertigen. Um die Flansche der Isolierstellen des Edelstahltorus mußten die Wicklungen U-förmig gebogen werden.
- 7) Die größten Kräfte entstehen an den Anschlüssen, wo die inneren Vertikalfeld- oder die helischen Wicklungen die Feldlinien des Hauptfeldes (maximal 3 T) rechtwinklig schneiden (900 N pro cm Wicklungslänge).
- 8) Die Wicklungen mußten gegen die in den Windungen auftretenden induzierten Spannungen isoliert werden.

Abb. 2 zeigt die fertig montierten Wicklungen.

Die Endprüfung wurde mit folgenden Prüfdaten vorgenommen:

- 1) Spannungsfestigkeit 1,5 kV gegen Torus.
- 2) Maximaler Prüfstrom 43 kA bei 100 ms (Stromdichte $36000 \frac{A}{cm^2}$), dabei Erwärmung der Wicklung um theoretisch $74^{\circ} C$.

Nach erfolgreicher Endprüfung wurden noch Thermofühler und Magnetfeldsonden an den Wicklungen montiert.

1.2.3. RF-Vorionisation und -Heizung

(S. Corti, M. Bergbauer, A. Capitanio, A. van Heumen, G. Lisitano, A. Reiter, E. Rossetti)

In der Entwurfphase des Pulsator war zunächst an keine RF-Heizung gedacht. Lediglich für eine Vorionisation wurde die in Abb. 6 gezeigte L-Spule eingebaut. Die L-Spule ist bekanntlich frequenzunabhängig und die zwei RF-Buchsen sind für maximal 2 bis 5 kW RF-Leistung

vorgesehen. Aus räumlichen Gründen war das Anbringen von leistungsfähigeren Buchsen nicht möglich. Während des Aufbaus des Vakuumgefäßes wurde, ermutigt durch Vorversuche, der Einbau einer zweiten L-Spule in Form einer Doppel-L-Spule beschlossen (Abb. 7). An diese Spule kann wiederum ca. 5 bis 10 kW Impuls-RF-Leistung in beliebigem Frequenzbereich angekoppelt werden. Zur Zeit sind somit 3 x 5 kW Impulsleistung im S-Band (2,4 GHz) für die Vorionisation verfügbar.

Die entscheidende Möglichkeit für die RF-Heizung im "Pulsator" bietet sich durch die Limiter-Öffnung. Zur Zeit wird an einer austauschbaren Kombination Limiter-Spule im Frequenzbereich ab 600 MHz und einem Impulsleistungspegel von ca. 100 kW bis 1/2 MW gearbeitet. Somit besteht die Möglichkeit, das Plasma im Bereich der Ionenplasmafrequenz und der unteren Hybridfrequenz zu heizen.

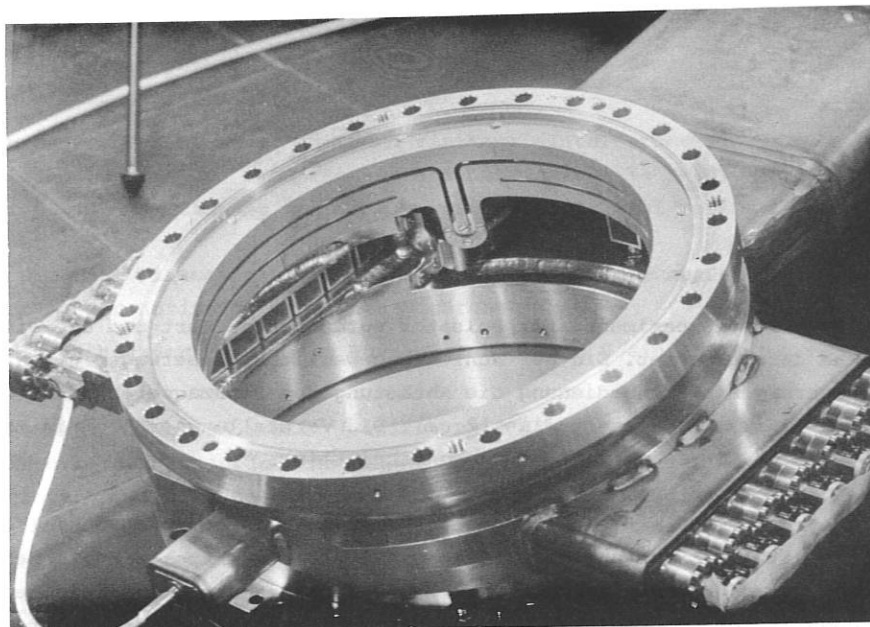


Abb. 6 L-Spule für Vorionisation und Mikrowellen-Interferometeranschluß (8 vertikale und 1 horizontaler Strahl)

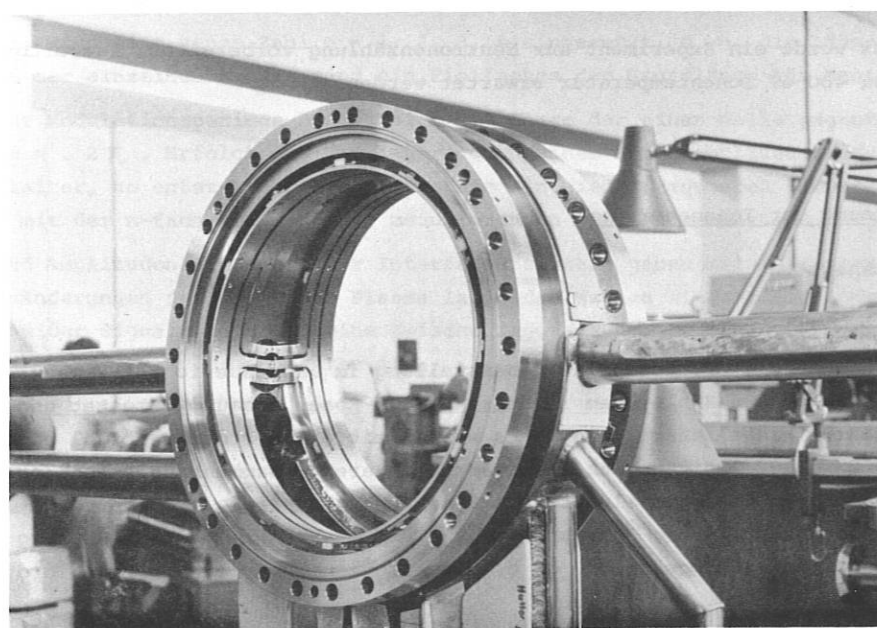


Abb. 7 In einem Kreuzstück eingebaute Doppel-L-Spule

1.2.4. Limiter

(R. Allgeyer, F. Karger)

Der Limiter ist in radialer Richtung verschiebbar und für Beobachtungszwecke kippbar. Er kann durch eine Vakuumschleuse hindurch ausgetauscht werden. Vier verschiedene Größen wurden gefertigt: drei kreisförmige mit 8 cm, 10 cm und 12 cm Radius sowie ein Rail-Limiter mit 16 x 24 cm. Für jede Größe stehen für Versuchszwecke vier Werkstoffe zur Verfügung: Wolfram (segmentiert), Molybdän (segmentiert), Tantal (massiv), Cowudur (segmentiert).

1.3. Diagnostik

1.3.1. Thomson-Streuung

(D. Meisel)

Der Aufbau des Laserstreuexperimentes für Pulsator wurde fortgeführt und die einzelnen Komponenten weitgehend durchgetestet. Ein auf Schienen beweglicher Laserwagen gestattet über eine pneumatische Steuerung mit Fernbedienung die Abtastung des Plasmaquerschnitts bis zu einem Radius von 10 cm (maximaler Limiterradius 12 cm). Die Verstellung erfolgt in radialer Richtung in 2-cm-Schritten, in axialer Richtung kontinuierlich.

Einen relativ großen Aufwand an Zeit erforderte die Entwicklung einer Multiplierschaltung zur elektronischen, digitalen Erfassung der Streusignale. (Die elektronischen Arbeiten wurden hauptsächlich von Herrn Groening durchgeführt.) Die Hochspannung der Multiplier wird bei dem jetzt vorliegenden System für einige μ s hochgetastet; innerhalb dieses Zeitraumes wird durch einen Gate-Impuls von etwa 100 ns Dauer das Streusignal aus dem Untergrund von Plasmaleuchten und Rauschen selektiert und integriert. Das integrierte Signal wird zeitlich etwas später digital ausgewertet und dem Rechner zugeführt.

Darüber hinaus wurde ein Experiment zur Neutronenzählung vorbereitet. Auswertbare Ergebnisse können ab etwa 400 eV Ionentemperatur erwartet werden.

1.3.2. Bestimmung der Ionenenergie

(D. Eckhartt)

Der Ionenenergieanalysator, dessen Aufgabenstellung im Jahresbericht 1971 beschrieben ist, wurde samt Nachweis- und Zählsystem in Fontenay-aux-Roses gebaut, getestet und gegen Ende des Berichtsjahres ausgeliefert. Die Tests wurden mit einem Protonenstrahl niedriger Intensität durchgeführt. Sie zeigten den erwarteten linearen Zusammenhang zwischen Ionenenergie und Ablenkspannung am Energieanalysator: 278 eV Protonenenergie erfordern 100 Volt Ablenkspannung. Die Energieauflösung $\frac{\Delta E}{E}$ beträgt etwa 2 % - abhängig von der Öffnung der verwendeten Spalte -. Der Konversionsfaktor, d. h. die Anzahl nachgewiesener Ionen pro einfallendes

Neutralteilchen, stimmt mit den aus der Literatur bekannten Werten befriedigend überein. Der zum Nachweis der geladenen Teilchen verwendete Detektor, ein magnetischer Multiplier vom Typ Bendix M 310, gestattet Zählraten bis 3×10^6 pro Sekunde. Die Zählimpulse laufen über einen Untersetzer in einen Speicher mit 256 Kanälen. Die Anlage wird nunmehr vervollständigt durch die Komponenten, welche vereinbarungsgemäß vom IPP geliefert werden.

1.3.3. Mikrowellen-Interferometrie

(E. Rossetti, G. Lisitano, S. Corti)

Durch ein im Jahre 1960 von G. Lisitano⁺⁾ modifiziertes Wharton-Verfahren wird die Untersetzung einer beliebigen Frequenz in eine beliebig niedrige Zwischenfrequenz ohne Zuhilfenahme eines Untersetzungssoszillators ermöglicht.

Mit einem nach diesem Verfahren arbeitenden Vielkanal-Interferometer wurde im Tokamak T₃⁺⁺⁾ der raum-zeitliche Verlauf der Elektronendichte bestimmt. Alle Kanäle arbeiten in demselben mm-Wellenbereich und die Trennung der Kanäle wurde mit der Wahl verschiedener Zwischenfrequenzen erreicht.

Im Pulsator I wird die Plasmasäule nach dieser Methode längs acht Sehnen in der vertikalen und einer Sehne in der horizontalen Richtung durchstrahlt.

Bild 6 zeigt den Aufbau der speziellen Hornantennen, Bild 8 ein Prinzip-Schaltbild des 9-Kanal-Interferometers.

Je ein Klystron im 3 mm-Wellenbereich (Varian VRB 2111-A, $f_0 = 88,5$ GHz) speist ein 4-Kanal-system. Der Mikrowellenaufbau für eine der beiden 4-Kanal-Einheiten ist im Bild 9 gezeigt. Der Klystrongenerator wird in der Frequenz sägezahnförmig moduliert. Der Frequenzhub ist so klein gewählt, daß innerhalb einer Modulationsperiode keine nennenswerten Amplitudenänderungen der Klystro-Eigenschwingungen entstehen.

Mit Hilfe von Richtkopplern wird die im Referenzzweig auf das Plasma hinlaufende Welle ausgeblendet und in einer Mischstufe mit der durch das Plasma laufenden Welle überlagert. Durch Verwendung einer Verzögerungsleitung durchlaufen beide Wellen verschiedene Wege. Zwischen dem Frequenzhub Δf und der Laufwegdifferenz L wird die einfache Beziehung $n \Delta f L = v_g$ hergestellt, wobei v_g die Gruppengeschwindigkeit der Wellen ist.

Für jeden Kanal wird eine ganze Zahl $n = 1, 2, 3, 4$ eingesetzt, d. h. die Längen der Verzögerungsleitungen der einzelnen Kanäle sind ein Vielfaches der Grundlänge für Kanal 1.

Innerhalb einer Modulationsperiode ändert sich die Phase der einen Welle gegenüber der anderen fortlaufend um $n \cdot 2\pi$. Erfolgt die Überlagerung an einem mit nichtlinearen Kennlinien versehenen Richtleiter, so entsteht in der Mischstufe ein niederfrequentes sinusförmiges Interferenzsignal, mit der n-fach-Frequenz der modulierenden Sägezahnspannung.

Die Phasen- und Amplitudenänderungen der Interferenzsignale geben maßstabgetreu die Phasen- und Amplitudenänderungen der durch das Plasma laufenden Wellen wieder. Als Endergebnis der Überlagerung beider Signale entsteht eine Zwischenfrequenz, deren Phase in Bezug auf das modulierende Signal leicht zu demodulieren ist.

+) G. Lisitano - Deutsches Patent 1139204 (1960)
G. Lisitano - Dissertation TH München (1964)

++) E.P. Gorbunov et al. - Sov.Phys.Tech.Phys. 13, 5 (1968)

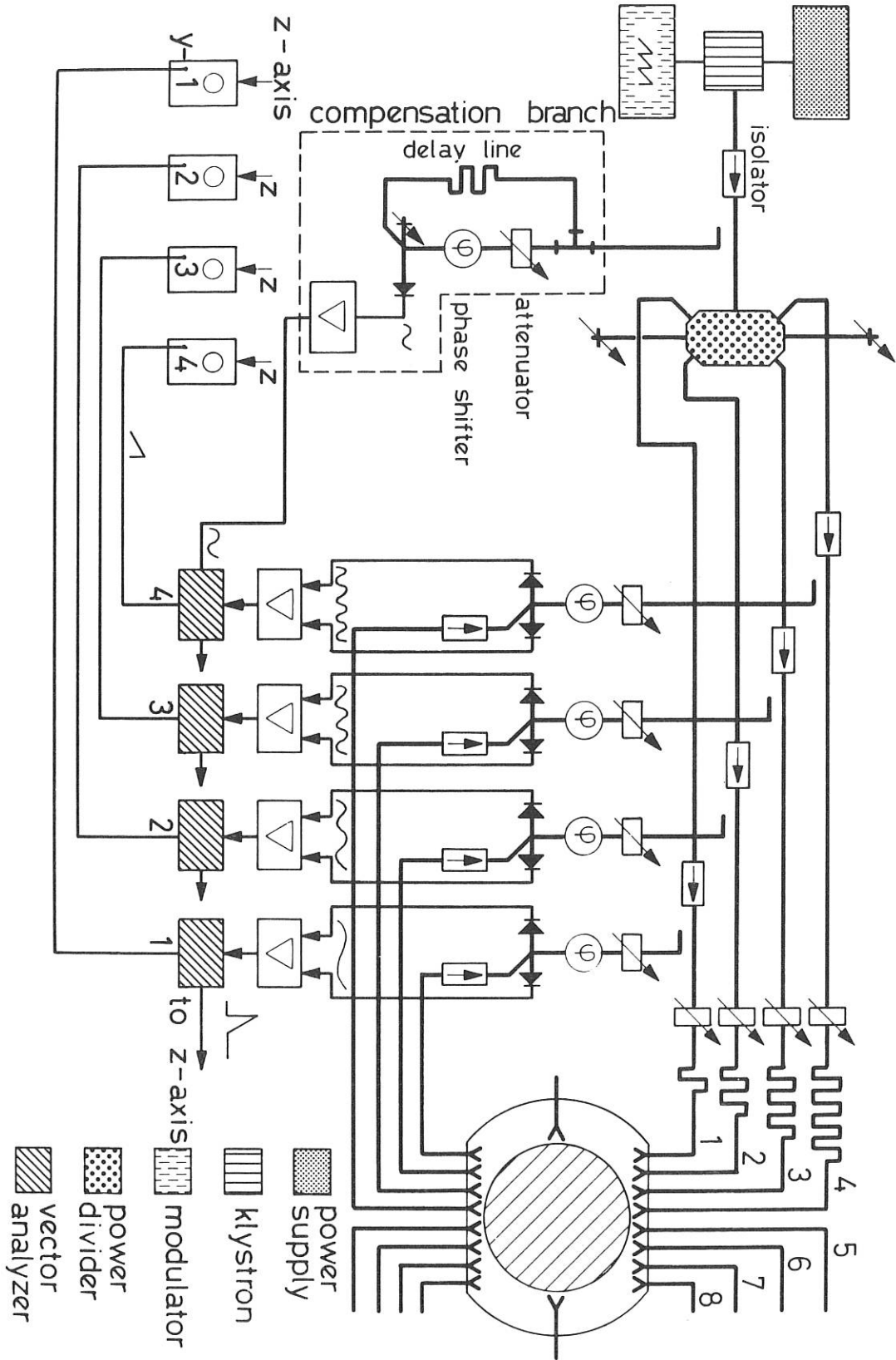


Abb. 8 Prinzip-Schaltbild des 9-Kanal-Interferometers

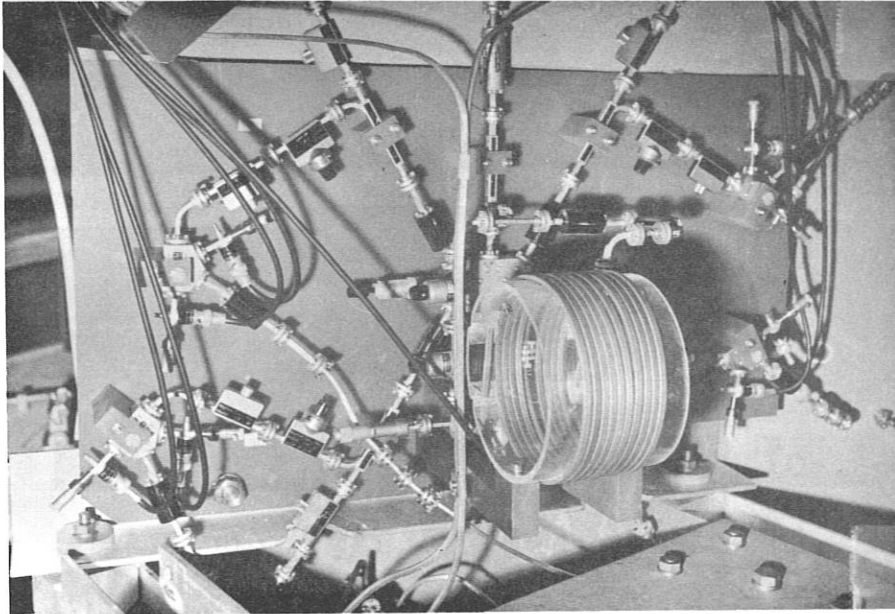


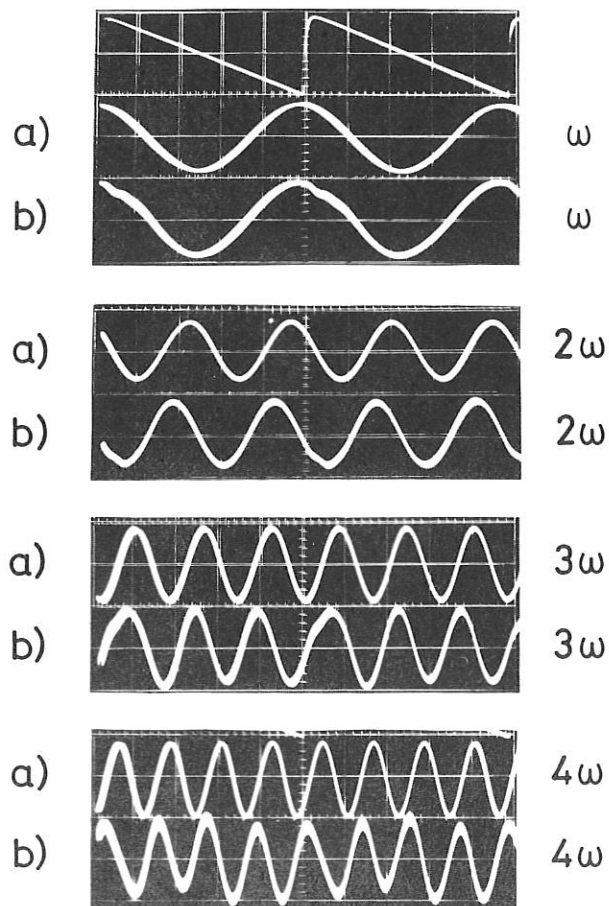
Abb. 9 Mikrowellen-Aufbau einer 4-Kanal-Einheit des
9-Kanal-Interferometers am Pulsator I

Der Frequenzhub Δf wird in der Größenordnung von 10 MHz eingestellt, also sehr klein gegenüber der Grundfrequenz von 88,5 GHz. Da auch die modulierende Frequenz von 100 kHz sehr niedrig ist, kann man die frequenzmodulierte Schwingung nahezu als eine reine Spektrallinie auffassen.

Bild 10 und Bild 11 zeigen die Zwischenfrequenzen $w = 100$ kHz für Kanal 1 und die Frequenzen $2w$, $3w$ und $4w$ für die entsprechenden Kanäle 2, 3 und 4.

In b ist das Interferenzsignal aus der Mischstufe mit Hilfe eines Breitbandverstärkers aufgenommen. In a wurde für dasselbe Signal ein abgestimmtes Filter eingeschaltet. Gemäß den Zeit- und Spektralbildern können diese niederfrequenten Interferenzsignale als verzerrungsfrei betrachtet werden.

1



2

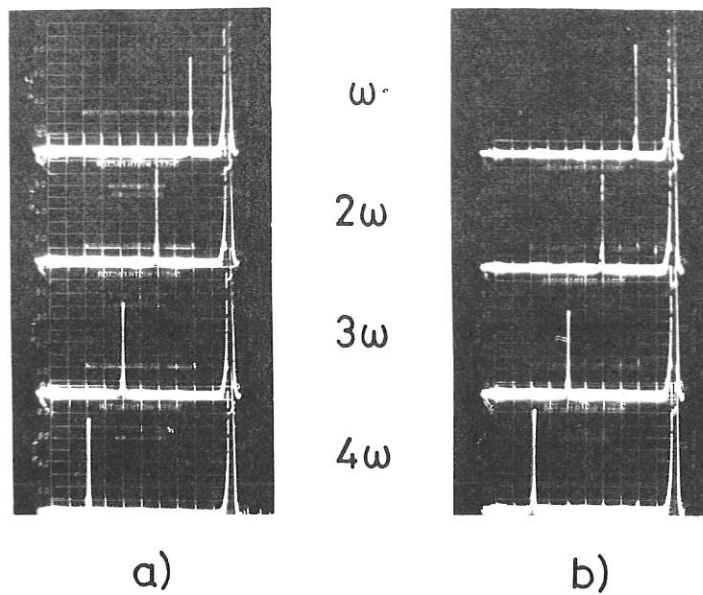


Abb. 10 und

Abb. 11 Interferenzsignale, $\omega = 100$ kHz, für Kanäle 1 bis 4

- a) Abgestimmte Verstärker
 b) Breitbandverstärker

Bild 12 zeigt das "Fringe-shift"-Verfahren zur Messung der Phasenverschiebung der durch das Plasma laufenden Wellen im Kanal 1 bis 4.

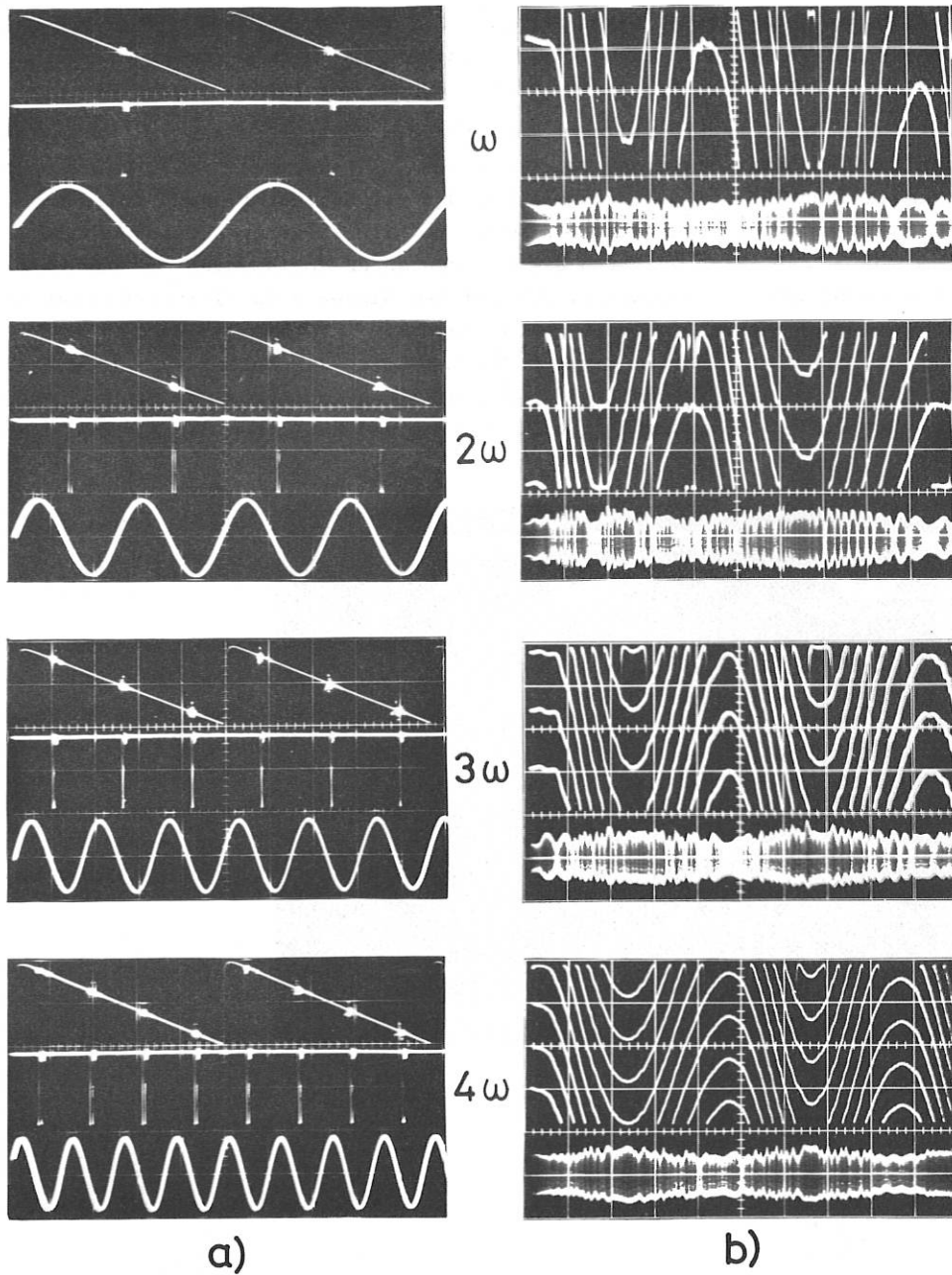


Abb. 12 "Fringe-shift"-Verfahren
 b) oberer Strahl: Phase-, unterer Strahl:
 Amplitude der Messwelle

In a werden bei jedem Nulldurchgang des Interferenzsignals kurze Impulse ausgelöst. Sie steuern die Helligkeit des Kathodenstrahls am Oszillographen, dessen y-Verstärker mit dem sägezahnförmigen Modulationssignal gespeist wird. Auf dieser Sägezahnspannung erscheinen dann n Leuchtpunkte. Hält man in b die Ablenkgeschwindigkeit des Oszillographen genügend klein gegenüber der Frequenz des modulierenden Signals, so ziehen sich die Sägezahnperioden zusammen. Die Leuchtpunkte bilden im oberen Strahl n Linien, deren senkrechte Ablenkung ein Maß für die Phasenverschiebung der Welle ist. Die Phasenanzeige ist unabhängig von Amplitudenänderungen der Welle (unterer Strahl). Die Phasenverschiebung der Meßwelle ist während des Aufbaus bei Verschieben eines dielektrischen Keiles durch die einzelnen vier Sehnen aufgenommen worden. Es wurde damit eine gute Trennung der Kanäle festgestellt.

Die Elektronik der 9 Kanäle ist nach dem röhrenbestückten Schalbild des im Jahre 1962 im IPP gebauten Sinus-Interferometers⁴⁾ von der Firma "ELVO-München" volltransistorisiert worden. Zur automatischen Zählung der Fringe während einer Entladung wurde in Zusammenarbeit mit Herrn Groening ein neues Verfahren entwickelt. Bild 13 zeigt die Ergebnisse dieses Verfahrens in einem Labor-Test. Nach weiteren Erprobungen an RF-Entladungen im "Dinnammare" wird dieses Verfahren im Pulsator I eingesetzt. Für den Bau dieses 9-Kanal-Interferometers mußte eine Anzahl von technologischen Problemen gelöst werden.

Als Beispiel zeigt Bild 14 den Bandpaß der mm-Wellen-Vakuumbenster. Der mechanische Aufbau des Fensters ist im Jahresbericht 1971, Seite 238, abgebildet. Das Zentrieren des Bandpasses auf 88,5 GHz wurde durch sorgfältige Berechnung und Schleifen des Aluminafensters ermöglicht.

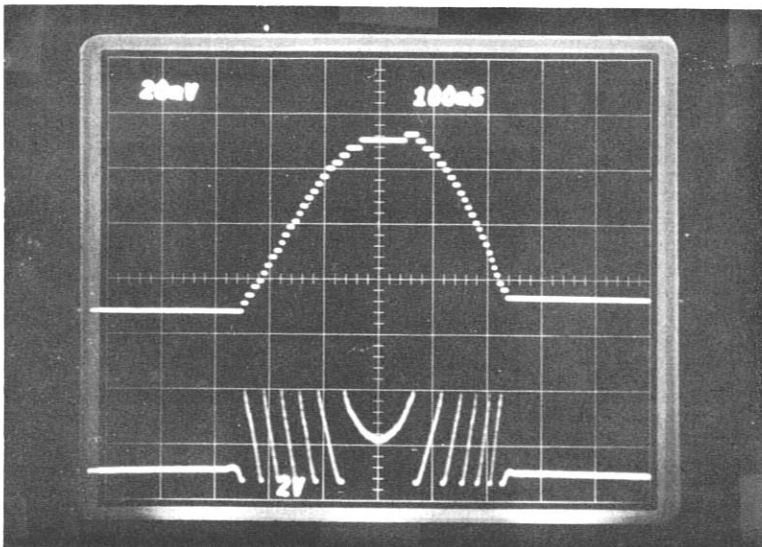


Abb. 13 Automatische Zählung der Fringe

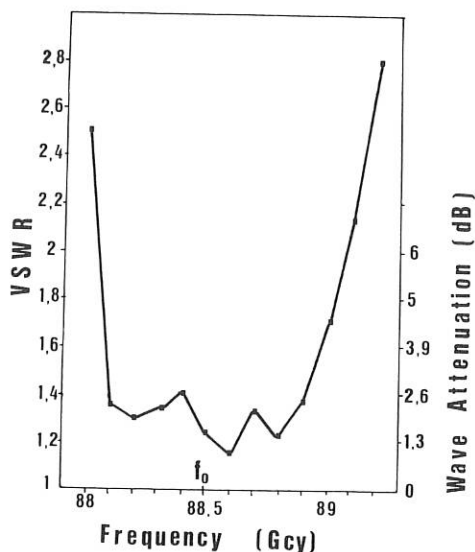


Abb. 14 Bandpaß der mm-Wellen-Vakuumbenster

Folgende technischen Zusatzeinrichtungen wurden für einen störungsfreien Betrieb entwickelt:

- a) Es wurde ein Kompensationszweig vorgesehen, mit dem die durch mechanische oder akustische Erschütterungen verursachten Phasenänderungen der Meßwellen beseitigt werden. Diese Störeffekte sind insbesondere während der stromstarken Entladung am Pulsator I zu erwarten.
- b) Bei der Verwendung eines angepaßten "Triple Hybrid Ring" zur Teilung der mm-Wellen-Senderleistung in die vier Kanäle wurde ein gesamter Leistungsverlust von nur 1 dB erreicht.

Wir danken insbesondere Herrn Bergbauer für seinen Beitrag zum Aufbau der Apparatur und die Entwicklungsarbeiten für die Mikrowellenkomponenten.

1.3.4. Röntgenstrahlungsmesssystem

(J. Fujita⁺), S. Sesnic)

Zur Messung von Röntgenstrahlung sind drei Meßsysteme vorbereitet:

1. Einige NaJ-Szintillatoren im Zusammenhang mit einem Pulshöhenanalysator werden verwendet, um die harten Röntgenstrahlen, hervorgerufen durch "run-away" Elektronen, zu untersuchen.
2. Ein Si(Li)-Detektor in Zusammenhang mit demselben Pulshöhenanalysator wird verwendet, um die weichen Röntgenstrahlen, verursacht durch die thermischen Elektronen oder Verunreinigungslinien, zu beobachten.
3. Um eine grobe Schätzung der Elektronenenergie-Verteilungsfunktion zu bekommen, wurde eine "single shot" Röntgenstrahlungsabsorptionsmethode entwickelt. Eine Reihe von sechs verschiedenen Röntgenstrahlenfiltern sind auf einer Drehscheibe angebracht. Diese Filter bewegen sich innerhalb von ungefähr 10 ms vor einem mit einem dünnen Fenster ausgerüsteten NaJ-Szintillator vorbei. Die Sperrenergien der Filter sind im Energiebereich zwischen 3.4 und 16 keV gestaffelt versetzt. Die durchgelassenen Röntgenstrahlungsphotonen werden dann durch einen schnellen Zähler gezählt und die Zählraten zu dem Datenverarbeitungssystem weitergeleitet.

Ein PDP 11 Prozeßrechner wird als Pulshöhenanalysator und Datenverarbeitungssystem für die Absorptionsmethode verwendet.

Alle drei Systeme sind im Detail entwickelt und sind jetzt entweder in der Aufbauphase oder einsatzbereit.

1.3.5. Optische Diagnostik

(K. Bethmann, R. Seth, G. Venus, H. Wulff)

Die Anlage zur raum aufgelösten, fotoelektrischen Registrierung der Strahlung im gesamten sichtbaren und Quarz-UV-Spektralgebiet wurde fertiggestellt und getestet. Vorhandene Drehspiegelkameras wurden zum Einsatz am Pulsator umgebaut.

⁺) Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya, Japan

1.3.6. Meß-Spulen

(F. Karger)

Folgende Meßspulen zur Strom- und Modenmessung wurden fertiggestellt, eingebaut und erprobt:

- 1) Zweiteilige Rogowski-Spule, auf Keramikring gewickelt, im Hochvakuum innerhalb des Liners zur Messung des Plasmastroms sowie nieder- und hochfrequenter Störungen und Verlagerungen des Plasmastroms.
- 2) 12 Einzelspulen, um den kleinen Umfang verteilt, auf Keramikring gewickelt, innerhalb des Liners zur Messung der Plasmaverschiebung (approximierte Sinus-Spule) und zur Feststellung der Modenzahl stationärer Oszillationen (NF und HF).
- 3) 8 Einzelspulen, um den großen Umfang verteilt, innerhalb des Liners zur Messung der Wellenlänge stationärer Oszillationen (NF und HF).
- 4) 20 Einzelspulen außerhalb des Liners, um den großen und kleinen Umfang verteilt, zur Messung des Limiterstroms und der in 1 - 3 genannten Größen im NF-Bereich.

1.3.7. Messung des poloidalen Magnetfeldes

(J. Fujita, K. McCormick)

Um die Stromverteilung in einem Tokamak-Plasma zu bestimmen, wurde ein System entwickelt, das die lokale Magnetfeldrichtung mißt. Diese Methode beruht auf dem Effekt, daß die unverschobene Komponente eines normalen Zeeman-Tripletts parallel zu dem überlagerten Magnetfeld polarisiert ist. Dieses wird dadurch ausgenutzt, daß man einen Schmalbandfilter in Serie mit einem Polarimeter mit kurzer Anstiegszeit verwendet, um den Winkel zu messen, um den das Feld als Funktion der Zeit rotiert. Sind dieser Winkel und die Stärke des Vakuumfeldes bekannt, kann das poloidale Magnetfeld bestimmt werden. Die räumliche Auflösung erfolgt durch Beobachtung des Lichts von Verunreinigungsatomen, die mittels Neutralstrahl-injektion örtlich eingeführt werden.

Aufbau und Prüfung des diagnostischen Systems werden 1973 an einer Hilfsapparatur durchgeführt werden.

1.3.8. Messung des Transformator-Streufeldes

(J. Gernhardt, O. Klüber, M. Lipa)

Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung des von den Primärwindungen des Transformators am Ort des Plasmas erzeugten poloidalen Magnetfeldes. Dieses hängt natürlich ganz wesentlich von der Magnetisierung des Transformator-kerns ab. Um möglichst realitätsnahe Bedingungen zu erzielen, wurden die Primärspulen im Original verwendet und es wurde anstelle des Plasmas ein sog. Simulator eingesetzt, nämlich ein ringförmiger Hohlleiter aus Kupferblech, der hinsichtlich Außenabmessungen und Widerstand dem späteren Plasma entspricht. Der im Simulator

induzierte Strom erzeugt in dessen Innenraum aufgrund der toroidalen Krümmung ein Magnetfeld, das - in einem Abstand von den leitenden Wänden - in guter Näherung homogen und senkrecht zur Mittelebene des Torus ist. Das ergab sich übereinstimmend aus den von F. Pohl durchgeführten numerischen Rechnungen und aus Messungen, bei denen der aufgetrennte Simulator direkt mit Strom beschickt wurde. Die Rechnungen und zunächst auch die Messungen wurden für $\mu = 1$ durchgeführt; spätere Messungen mit direkter Beschickung des im Transformator befindlichen Simulators zeigten, daß die Anwesenheit des Eisenkerns den Betrag der Feldstärke pro Strom im Simulator erheblich, nämlich von 4,3 G/kA auf 2,1 G/kA reduziert.

Das Magnetfeld im Inneren des Simulators, also am Ort des späteren Plasmas, wurde mit drei orthogonalen Meßschleifen, die auf einer Kugel aufgewickelt waren, ausgemessen. Mit Hilfe einer Rogowski-Spule und einer Spannungsteilerschaltung kann der vom Sekundärstrom im Simulator gelieferte Beitrag zum poloidalen Feld wegkompensiert werden. Die dazu erforderlichen, wegen der Feldhomogenität in der Umgebung der magnetischen Achse nur sehr schwach ortsabhängigen Einstellungen am Spannungsteiler wurden bei direkt mit Strom beschicktem Simulator ermittelt.

Die Primärwicklungen des Transformators waren von der Abteilung Technik anhand umfangreicher numerischer Rechnungen so ausgelegt worden, daß das von ihnen am Ort des Plasmas erzeugte poloidale Magnetfeld das von der toroidalen Krümmung herrührende aufhebt; ein druckloses Plasma wäre dann auch bei fehlender Kupferschale im Gleichgewicht. Die Messungen zeigten, daß dieses Ziel auch annähernd, nämlich bis auf ein Restfeld von 0,6 G/kA erreicht wurde. Um die Experimentierbedingungen variieren zu können, soll außerdem versucht werden, das primäre Streufeld durch Veränderung der Beschaltung zu minimalisieren, also eine Konfiguration zu erzielen, wie sie bei den meisten anderen Tokamak-Experimenten angestrebt wurde.

Die Streufeldmessungen lieferten außerdem weitere, für den späteren Betrieb von Pulsator wichtige Aufschlüsse über die Eigenschaften des Transformators, insbesondere über die vom Transformatorfeld auf die Hauptfeldspulen ausgeübten Kräfte. Die Ergebnisse werden nach Abschluß der Messungen in einem Bericht zusammengefaßt.

1.4. Software-Entwicklung 1973

(R. Lathe)

Die Entwicklung der Software für den zum Experiment gehörenden Prozeßrechner für das Jahr 1972 umfaßte in erster Linie drei Problemgebiete, nämlich

- 1) die graphische Darstellung von Rohdaten und ausgewerteten experimentellen Daten;
- 2) Multicomputer-Verbindungen (PDP-11-PDP-11);
- 3) das Vakuumkontrollsystem für Pulsator I.

Diese Probleme werden eingehend in den folgenden Abschnitten diskutiert.

Graphical Display Package

Ein Teil des Pulsator-Datenerfassungssystems besteht aus einem Tectronix 4002A-Bildschirm-Terminal. Das Terminal hat eine Tastatur, mit der man Daten oder Befehle direkt in das System eingeben kann und einen 16 x 21 cm großen Speicheroszillographen. Die Ausgabe über das Bildschirm-Terminal kann auf folgende Weise geschehen:

- 1) durch ASCII-Zeichen, die den Text auf dem Bildschirm mittels eines internen Hardware-Character-Generators erscheinen lassen
- oder
- 2) durch x-, y-Koordinaten-Paare, durch die eine Linie zwischen den zwei Punkten gezogen werden kann.

Das Graphical Display Package besteht aus einer Serie von Subroutinen, die man grob in komplizierte Fortran-, einfache Fortran- und Utility Routinen einteilen kann. Die Fortran-Routinen sind direkt kompatibel mit den PDP-11-Fortran-Normen und können von jedem Fortran-Programm mittels "Call Statements" angefordert werden. Die "Utility Routines" sind in erster Linie für den internen GDP-Gebrauch gedacht, können aber auch mittels der PDP-11-Assembly-Sprache (PAL) über den normalen JSR Befehl angefordert werden. Mit den komplizierten Routinen kann der Benutzer Textstrings entweder vertikal (VTEXT) oder horizontal (HTEXT) schreiben oder Kurven mit automatischer Randerkennung (GCURVE) zeichnen, indem er einfach die Anfangs-Koordinaten und die zu schreibenden oder zeichnenden Daten eingibt. Die einfacheren Routinen üben Funktionen aus, wie Löschung des Bildschirms, Auslösen der Alarmklingel, Bestimmung der Art und Größe des zu schreibenden Textes etc. Die "Utility Routines" befassen sich mit der eigentlichen Eingabe oder Ausgabe der Daten (Treibe-Routinen).

Auch eine "Standard Display Routine" (GRAPH) wurde als Teil des Pakets für den Benutzer geschrieben, der seine Daten mit einem minimalen Programm-Aufwand darstellen möchte und der das Standard-Display-Format von 10 x 10 cm akzeptiert (das der normalen Bildschirm-Größe eines Standard-Oszillographen entspricht). Ein Beispiel dieser Standard-Ausgabe wird im folgenden gegeben. Dem Benutzer wird die Möglichkeit geboten, die dargestellte Kurve automatisch zu vergrößern, so daß bestimmte Gebiete im Detail studiert werden können. Außerdem kann man mit der "Hard Copy Unit" Kopien machen.

Multicomputer-Systeme

Ein zweiter PDP-11-Computer wurde als zentrale Einheit für ein Pulshöhen-Analysensystem ausgewählt, das in Verbindung mit der Röntgendiagnostik benutzt werden soll. Zur Überführung der Daten vom PHA-System auf das Pulsator-Datenerfassungssystem wurde ein Interface zwischen zwei PDP-11-Rechner gekoppelt und die erforderliche Software geschrieben. Zwischen den zwei Computern wurden Nachrichten in Raten von ungefähr 10 kBytes/sec übermittelt. Mit der Bestellung eines PDP-11-(Modell 45) Central-Processors besteht jetzt die Möglichkeit einer direkten Verbindung der zwei Central-Processors zu einem gemeinsamen Kernspeicher-Block, wobei man einen echten Multiprocessor-Computer erhält.

Vakuum-Kontrollsystem

Ein Teil der Nebensysteme des Pulsators I besteht aus sechs Vakuumpumpständen zur Evakuierung des Torus, dem Mantel und den Diagnostikflanschen. Die Pumpstände können entweder von Hand von der Schalttafel aus kontrolliert werden oder automatisch über speziell entworfene CAMAC-Module.

Ein automatisches Überwachungs- und Kontrollprogramm, bestehend aus

- 1) Anlauf-Prozedur,
- 2) Abschalt-Prozedur,
- 3) Fehlererkennungs-Prozedur

wurde geschrieben, um das Vakuum-System automatisch zu kontrollieren. Während der automatischen Kontrolle braucht der Operator nur die gewünschte Funktion auszuwählen und in den Computer mittels einer Funktionstastatur einzugeben. Nachdem der Befehl angenommen ist, steuert der Computer die verschiedenen Ventile und Pumpen des Pumpstandes und führt die erforderlichen Operationen, die zu den gewünschten Resultaten führen, durch, während er in der Zwischenzeit den Zustand des Pumpstandes und Torus mittels eines Vakuum-Druckreglers und die Ventilstellungen überwacht.

Die Vakuum-Kontrollsystem-Routinen werden als ein integrierter Teil des PDP-11 Disk-Operating-Systems angesehen. Sie werden automatisch durch Interrupts vom Operator oder vom Vakuum-system selbst gestartet. Auf diese Weise können die Vakuum-Kontrollsystem-Routinen als Hintergrundprogramme betrieben werden, während Benutzerprogramme, wie Datenauswertungs- oder Display-Programme, laufen.

1.5. Elektronik

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

1.5.1. Vakuum-Pumpensteuerung

Beim Vakuumsystem des Pulsators I werden drei Arten der Steuerung angewandt

- a) Handsteuerung
- b) rechnergeführte Steuerung
- c) autonome Notsteuerung.

Die Handsteuerung besteht aus folgenden Einheiten:

Schaubild mit Schaltern und Meldelampen, Vakuummeßgeräte, Steuereinschub und Befehlsmultiplexer mit Netzteil und Phasensuchautomatik. Die beiden letzten Einheiten sind für alle drei Arten der Steuerung gemeinsam.

Sämtliche aus dem Vakuumsystem kommenden Meldungen liegen an allen Steuersystemen parallel an, die Befehle der Steuersysteme werden über einen Demultiplexer geführt, der nur die Befehle der jeweils angewählten Steuerart an den Steuereinschub weitergibt. Die Umschaltung zwischen rechnergeführter Steuerung und autonomer Notsteuerung wird von den beiden PDP 11 Statusbits AC-Low und Run hergeleitet. Das bedeutet, daß bei einer Netzstörung am Rechner der jeweilige Zustand des Vakuumsystems abgespeichert wird, bevor automatisch auf die Notsteuerung umgeschaltet wird.

Geht der Computer, aus welchem Grund immer, aus dem RUN-Mode, d. h. kann er keine Befehle mehr ausführen, wird wiederum automatisch auf die autonome Notsteuerung umgeschaltet.

Will man einen oder mehrere Pumpensätze von Hand aus steuern, so geschieht die Umschaltung mittels eines Schlüsselschalters für jeden Pumpsatz getrennt. Dadurch ist es auch möglich, einzelne Pumpensätze stillzusetzen, um an ihnen Modifikationen oder Reparaturen durchzuführen, während die übrigen Pumpensätze programmgemäß weiterarbeiten.

Die rechnergeführte und die Notsteuerung sind aus Camac-Modulen aufgebaut (Entwicklung der Module in Zusammenarbeit mit Abteilung Technik, F. Hofmeister und D. Zimmermann). Der Unterschied zwischen diesen beiden Steuersystemen besteht darin, daß bei der rechnergeführten

Steuerung die Anzahl der Programme und die Menge der Befehle nahezu beliebig sind, während bei der autonomen Steuerung nur ein fest vorgegebener Befehlssatz zur Anwendung kommt, der beim Auftreten einer Störung eine definierte Abschaltung der Pumpensätze vornimmt.

Schwierigkeiten brachte der Umstand mit sich, daß von den sechs Pumpensätzen nur zwei auf Erdpotential liegen. Alle anderen liegen während des Schusses auf einer Umlaufspannung bis zu 1000 V. Es mußten daher alle Pumpenmotore über Trenntrafos angeschlossen werden. Alle Magnet-schalter und Lageschalter der mit Preßluft betriebenen Ventile müssen hinreichend isoliert werden. Ferner mußten alle Vakuummeßröhren über Trennrelais, die während des Schusses öffnen, angeschlossen werden.

Die Handsteuerung läuft. Mit der Inbetriebnahme der rechnergeführten Steuerung ist bis Mitte März 1973 zu rechnen.

1.5.2. Gatebarer Fotomultiplier

Es wurde gewünscht, nach großen Lichtintensitäten noch kleine Lichtpulse auflösen zu können. Damit der Multiplier nicht in die Sättigung kam, bzw. die Teilerkapazitäten zu sehr entladen wurden, mußte der Multiplier gatebar gemacht werden. Zu diesem Zweck wurde das Beschleunigungsgitter dauernd auf - 50 V vorgespannt und dann für 1 bis 3 μ s auf + 150 V (bezogen auf Fotokatode) getastet. Nur während dieser Zeit war der Multiplier geöffnet. Das Schaltverhältnis ist größer als 100.

1.5.3. Schneller gatebarer Integrationsverstärker für Laserpulse

Laserpulse sollten integriert und der Endwert gehalten werden, ohne daß das Umgebungslicht das Integral sehr beeinflusst. Es mußte ein gatebarer Integrator entwickelt werden, dessen Öffnungszeit möglichst der Fußpunktbreite des Laserpulses entsprach.

Eingangsimpedanz	$Z = 50 \Omega$
Öffnungszeit	100 ns 3 μ s
Integrationskonstante	$U_a = 10^9 \text{ s}^{-1} \int U_e \text{ dt}$
max. Ausgangsspannung	$U_a = \pm 10 \text{ V}$
Abfallzeitkonstante	= 4 ms

1.5.4. Digitalisierung einer Lissajousfigur

Bei der Messung der Plasmadichte mittels Mikrowellen erhält man als NF-Signal auf einem XY-Display einen Leuchtpunkt, der bei Dichteänderung eine kreisförmige Bahn beschreibt. Dabei entspricht dem Abstand des Leuchtpunktes vom Mittelpunkt die Amplitude der Mikrowellen und dem konstanten Umlauf mit gleichbleibendem Drehsinn stetig steigende bzw. fallende Dichte.

Die elektronische Schaltung addiert bzw. subtrahiert die Durchläufe von $\pi/2$ drehsinnrichtig. Bei zu kleiner Spannung (Signal Rausch-Verhältnis) sorgt die eingebaute Sperre dafür, daß keine Fehlzählungen auftreten. Am Ausgang steht die Information digital (8bit) oder als analoge Spannung zur Verfügung.

2. Theoretische Arbeiten

2.1. Voruntersuchungen für ein Multipol-Experiment

Die Realisierung eines limiterlosen Tokamaks bzw. genauer eines Tokamaks, in dem der materielle Limiter durch eine immaterielle magnetische Separatrix ersetzt ist, könnte einen großen Fortschritt in der Tokamak-Forschung bewirken und wird deswegen - als zweiter Schritt des IPP-Tokamak-Programms - in der Abteilung diskutiert; Voruntersuchungen sind angelaufen.

2.1.1. Berechnung von Feldkonfigurationen

(G. Lehner, F. Pohl)

Zur Schaffung von Diskussionsgrundlagen in Zusammenhang mit Multipol-Plänen wurde eine ganze Reihe von magnetischen Konfigurationen mit geeignet gewählten äußeren Strömen und Plasmaströmen durchgerechnet.

Bei vernünftiger Wahl der Zahl der äußeren Leiter und der verschiedenen Ströme ist es möglich, Konfigurationen zu erhalten, die der Forderung entsprechen, daß die Separatrix ganz innerhalb des Gefäßes liegt, um wie ein Limiter wirken zu können. In gewissen Fällen ergeben sich dabei Konfigurationen, die gleichzeitig weitere interessante Eigenschaften haben und zwar

- a) auch für einen axisymmetrischen Divertor geeignet sind,
- b) bei entsprechender Steuerung das Gleichgewicht bewirken können (d. h. man kann auf die Schale verzichten)
- c) gleichzeitig auch die Verwendung der Multipolströme als Primärströme eines Transformators zur Ohm'schen Heizung erlauben (bis auf kleinere Korrekturen, die regelbar zusätzlich erforderlich wären).

Ein Teil der Ergebnisse ist in einem eben fertiggestellten Bericht (IPP III/6) ausführlich diskutiert.

Die oben beschriebenen Untersuchungen berücksichtigen die magneto hydrodynamischen Gleichgewichtsprobleme nur näherungsweise. Diese wurden von W. Feneberg und K. Lackner behandelt; s. dazu den folgenden Abschnitt.

2.1.2. Tokamak-Multipol-Gleichgewichte

(W. Feneberg)

In Zusammenarbeit mit K. Lackner wurde ein numerisches Verfahren entwickelt, welches die Berechnung axialsymmetrischer Tokamakgleichgewichte gestattet. Es wurden Fälle behandelt, bei denen das Gleichgewicht durch die Überlagerung des Magnetfeldes des Plasmastroms mit dem Magnetfeld von Strömen erzeugt wird, welche in äußeren Leitern fließen. Die Rechnungen sind wichtig sowohl für die Konstruktion eines axialsymmetrischen Divertors im Tokamak, als auch

für eine gezielte Verformung des Plasmaquerschnitts. Auf dem APS-Meeting in Monterey wurde darüber ein Vortrag gehalten mit dem Titel: "Multipol-Tokamak Equilibria, W. Feneberg and K. Lackner". Die Abbildung 15 zeigt ein Beispiel für ein Gleichgewicht mit magnetischer Separatrix, die einen Stagnationspunkt auf der Innenseite der Plasmasäule besitzt. Die vier Ströme in den äußeren Leitern fließen entgegengesetzt zur Richtung des Plasmastroms. Es ist $|I_2| = \frac{1}{2} |I_1|$, der Strom auf der Innenseite I_1 ist etwa so groß wie der Plasmastrom. Diese Konfiguration, welche von G. Lehner für ein Divertorexperiment vorgeschlagen wurde, besitzt starke Kopplung zwischen Plasmastrom und dem Leiterstrom: Jede Änderung des Leiterstroms induziert ein elektrisches Feld in toroidaler Richtung, welches den Plasmastrom verändert.

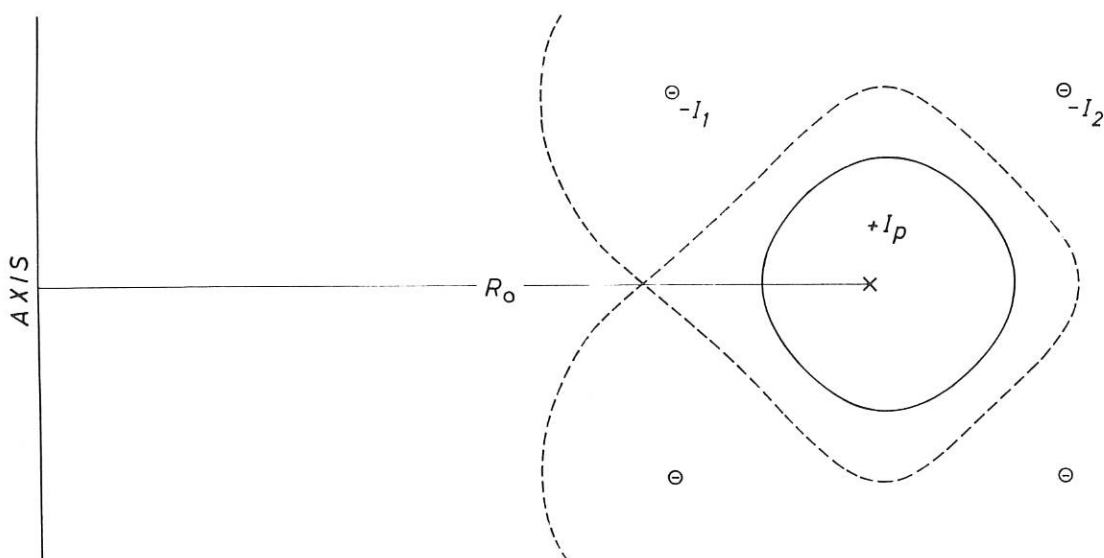


Abb. 15 Beispiel für eine Tokamak-Multipol-Gleichgewichtskonfiguration. Der Plasmastrom I_p fließt innerhalb der ausgezogenen Kurve.
 $|I_1| = 0,725 |I_p|$, $|I_2| = 0,362 |I_p|$

2.2. Toroidale Gleichgewichte mit Strömung

(H.P. Zehrfeld, B.J. Green⁺)

Die Injektion von Teilchen in Plasmen toroidaler Apparaturen ist in der letzten Zeit in verstärktem Maße Gegenstand experimenteller und theoretischer Untersuchungen. Die zur Heizung oder zur Aufrechterhaltung der Teilchendichte verwendete Injektion ist mit einer nicht unbedeutlichen Übertragung von Impuls auf das Plasma im Einschlußbereich verbunden. Selbst wenn es gelingt, den Nettoübertrag zum Verschwinden zu bringen, bleiben lokale Effekte /Callen J.D. and Clarke J.F., Bull. Am.Phys. 16 (1971) 1261/, die zur Ausbildung von Strömung führen.

⁺) Abteilung Theorie

Strömungen in selbstkonsistenten toroidalen Gleichgewichtskonfigurationen führen zu Dichtevariationen auf magnetischen Flächen, zu einer geänderten räumlichen Abhängigkeit des für die Stabilitätseigenschaften des Plasmas wichtigen toroidalen Magnetfeldes und zu einer Rückwirkung dieser Effekte auf Lage und Form der magnetischen Flächen. Rotation erhöht den Diamagnetismus des Plasmas. Vorzeichen und Größe der Plasmaverschiebung hängen wesentlich von der Form des radialen Profils der kinetischen Energiedichten ab. Die Krümmungseigenschaften nicht kreisförmiger Querschnitte magnetischer Flächen führen in der Bilanz radialer Kräfte auf das Plasma zu einer Betonung zentrifugaler Effekte und sind damit für Konfigurationen mit immateriellem Limiter von Wichtigkeit.

3. RF-Plasmaheizung

(S. Corti, M. Bergbauer, A. Capitanio, A. van Heumen, G. Lisitano, A. Reiter, E. Rossetti)

3.1. Wellen- und Turbulenz-Heizung

Zwei scheinbar verschiedene Gesichtspunkte bei der RF-Plasmaheizung stehen z.Z. in harter Konfrontation:

- 1) Die klassische Umwandlung von Vakuumwellen in bestimmten Plasmawellen und deren Absorption durch lineare und nichtlineare Landau-Dämpfung.

Bei niedrigem RF-Signalpegel herrscht gute Übereinstimmung zwischen den Experimenten und Theorien der Wellenausbreitung im Plasma. Übereinstimmung herrscht auch für die Wellenabsorption bei Landau-Dämpfung.

- 2) Die nichtresonante oder Turbulenz-RF-Plasmaheizung.

Der Unterschied zur klassischen Umwandlung (Punkt 1) liegt in dem hohen, zum Studium der Wellen-Plasma-Wechselwirkung angewandten RF-Leistungspegel.

Bei hohem RF-Leistungspegel wird die meiste RF-Energie in Plasmaturbulenz umgewandelt, so daß das Hauptproblem der RF-Heizung die Erhaltung des Einschlußvermögens der fusionsorientierten Experimente ist.

3.1.1. Plasmawellen-Frequenzbereiche

Tafel 1 gibt eine Übersicht über die Frequenzbereiche der wichtigsten RF-Plasmaheizmethoden für die fusionsorientierten Experimente des IPP. Das Plasmadichteprofil ist mit Angabe der Plasmaresonanzfrequenzen für Dichtezahlen von $N_e = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ bis $N_e = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ berücksichtigt.

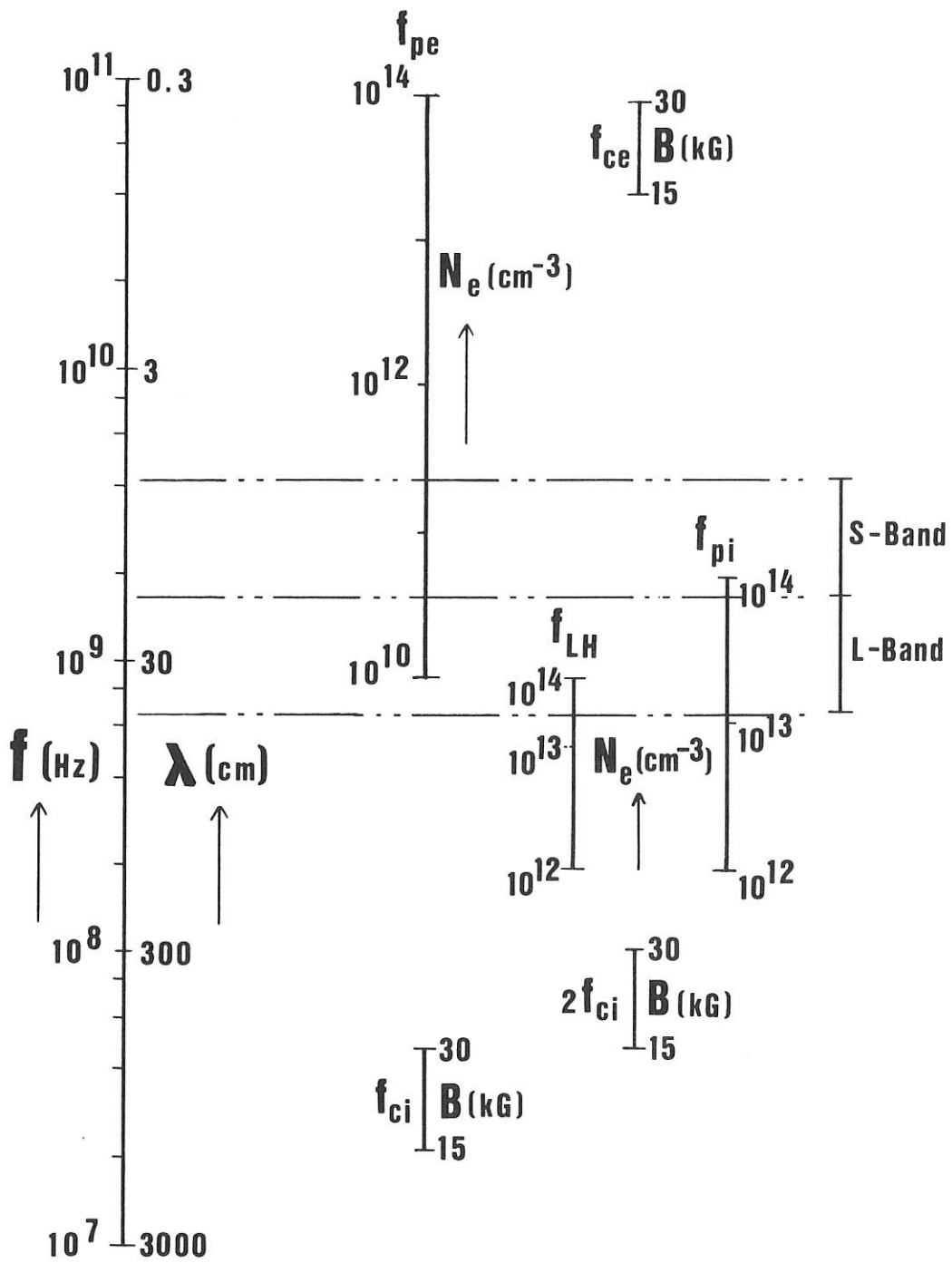
Die Unter-Hybrid-Frequenz " f_{LH} " wurde für eine Magnetfeldstärke $B > 15 \text{ kG}$ berechnet.

Aus Tafel I sieht man, daß im oberen L- und S-Band ($5 \cdot 10^8$ bis $5 \cdot 10^9$ Hz) drei der wichtigsten Plasmaresonanz-Frequenzbereiche auftreten: die Elektronen-Plasmafrequenz " f_{pe} "; die Ionen-Plasmafrequenz " f_{pi} " und die "Lower-Hybrid"-Plasmafrequenz " f_{LH} ".

Die entsprechende Vakuum-Wellenlänge dieses Frequenzbereichs (von einigen Zentimetern bis einigen Dezimetern) sind sehr günstig für eine gute Transformation von Vakuumwellen in Plasmawellen).

3.1.2. RF-Turbulenz-Heizung und Frequenzwahl

Auf einem Plasmadichteprofil zeigt Abbildung 16 die Resonanzzonen für eine mögliche Wellenenergie-Umwandlung in der Mitte dieses Frequenzbereiches. Bei dieser und höheren Frequenzen, z.B. im S-Band, wird die RF-Energie, bei $f < f_{pe}$, entweder reflektiert oder, bei höheren Leistungspegeln, in Plasmaturbulenz am Rand des Plasmaprofils umgewandelt.



TAFEL 1

Diese als anomale Absorption / 1 / bezeichnete Wellendämpfung hängt nicht von dem Vorhandensein einer bestimmten Wellen-Plasmaresonanz ab. Die Eindringtiefe der Welle im Plasma ermöglicht, auch für $f < f_{pe}$ die Umwandlung der RF-Energie in Plasma-Turbulenz.

Für $f < f_{pe}$ wird die meiste Energie am Plasmarand absorbiert, bevor die Welle die Resonanzzone $f \approx f_{LH}$ im Inneren der Plasmasäule erreicht hat. Es ist deshalb zu erwarten, daß nur ein kleiner Anteil der RF-Energie in Plasmawellen der Unteren-Hybrid- oder Ionen-Plasmafrequenz umgewandelt wird.

Dasselbe gilt auch für den neuerlich behaupteten Zerfall der RF-Energie in zwei oder mehrere kohärente Plasmawellen. / 2 /

Im allgemeinen sollte man berücksichtigen, daß kohärente Plasmawellen-Phänomene nur in relativ dünnen Plasmen ($N_e \lesssim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) aber nicht, wie später gezeigt wird, in relativ dichten ($N_e \gtrsim 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) und thermalisierten Plasmen anzutreffen sind.

Für die frequenzunabhängige RF-Turbulenz-Heizung einiger fusionsorientierter Experimente im IPP wurde die Arbeitsfrequenz im S-Band bei $f = 2,4 \text{ GHz}$ gewählt.

Bei dieser Frequenz ist praktisch unbegrenzte RF-Energie in der niedrigsten Preislage des ganzen RF-Spektrums kommerziell vorhanden. Bei optimalem Wirkungsgrad unter möglicher Erhaltung der Plasma-Einschlußzeiten wird die RF-Leistung Schritt für Schritt von einigen 10 kW bis zu noch festzustellenden Grenzen vergrößert.

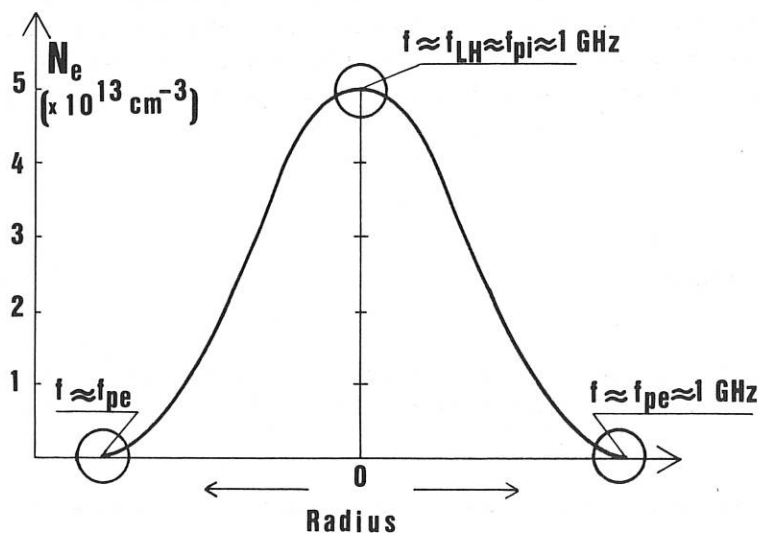


Abb. 16 Resonanzzone für Wellenergie-Umwandlung

/ 1 / Krueer, W.L., P.K. Kaw, J.M. Dawson and S. Oberman, P.P.L.Report MATT-756 (1972)

/ 2 / Porkolab, M., V. Arunasalam and R.A. Ellis Jr., Phys.Rev.Lett. 29, 1438 (1972)

3.1.3. RF-Strukturen

Mittels RF-Strukturen wird die RF-Energie an die Plasmalast angepaßt. Alle bekannten RF-Strukturen im Frequenzbereich der wichtigsten Wellentypen wurden auf ihre Eigenschaften zur Anwendung bei den fusionsorientierten Experimenten untersucht.

Aus diesen, in mehreren Jahren gewonnenen Erkenntnissen wurden im IPP einige neue RF-Plasmaquellen entwickelt. In diesen Plasmaquellen wurden zum erstenmal verschiedene, z. T. neuartige Wellenverzögerungsstrukturen verwendet. Sie sind inzwischen als "Lisitano-Spulen" international im Fachbereich bekannt wegen ihrer hohen Wirkungsgrade und ihrer guten Anpassung innerhalb eines sehr breiten Bereichs von Plasma-Parametern und Frequenzen von 10^8 Hz bis 10^{10} Hz. Einige Beispiele dieser Strukturen sind in den Abbildungen 7, 17 und 23 gezeigt. Im Hinblick auf die Verwendung in fusionsorientierten Experimenten werden diese RF-Strukturen möglichst ohne Isolationsmaterial gebaut.

Die Haupteigenschaft dieser "L"-Strukturen ist die weitgehende Erhaltung des Einschlußvermögens der fusionsorientierten Experimente.

Dies wird durch die symmetrische Verteilung der RF-Energie um die Plasmasäule herum ermöglicht. Die Minimum-RF-Feld-Konfiguration der eingespeisten RF-Energie innerhalb der "L"-Strukturen hat anscheinend noch dazu einen stabilisierenden Effekt auf das eingeschlossene RF-geheizte Plasma.

Im Vergleich mit anderen bekannten RF-Strukturen (z. B. "Dix-Loaded-Waveguide", "Stix-Spulen", etc.) verengen diese Strukturen nur geringfügig (im Schatten eines normalen Limiters) den Innenwanddurchmesser einer Entladungsröhre.

Die Zuleitungen zu den RF-Strukturen wurden mittels Vakuumsteckerverbindungen zum Zwecke einer raschen Austauschmöglichkeit vorgesehen. Dies ist von großem Vorteil, insbesondere bei komplizierten und teuren Experimenten, wie z. B. beim Tokamak und bei den Stellaratoren. Zufällige Buchschäden kann man bei diesen Maschinen ohne kostbaren Zeitverlust sofort beheben.

3.2. RF-Plasmaheizungsanlagen

Bei größeren Maschinen, die nur von RF-Experten betrieben werden können, besteht die Gefahr, (nur) einseitige Erkenntnisse abseits der fundamentalen Aspekte der fusionsrelevanten Experimente zu gewinnen.

Bei den nachstehend beschriebenen Apparaturen werden deshalb die Eigenschaften des RF-geheizten Plasmas hauptsächlich von der an dem betreffenden fusionsorientierten Experiment beteiligten Experimentiergruppe studiert, genauso wie z. B. bei der Ohm'schen Heizung.

Dies betrifft insbesondere die RF-Plasmaheizungsanlagen am Stellarator Wendelstein W II b und am Tokamak Pulsator I. In Zusammenarbeit mit der W II b-Experimentiergruppe wurde ein Teil der RF-Anlagen am W II b bereits in Betrieb genommen. Von diesen Anlagen wird im folgenden nur über die RF-Heizungsaspekte berichtet.

Wir sind der W II b-Gruppe sehr dankbar für das uns gegebene Vertrauen und für die Möglichkeit, diese Studien (in netter und wirkungsvoller Zusammenarbeit) durchführen zu können.

3.2.1. Stellarator W II b

In Zusammenarbeit mit der Gruppe des W II b-Stellarators wurden im W II b drei L-Spulen eingebaut (siehe Skizze der W II b im Bericht der Abteilung 2). Der innere Durchmesser dieser Spule (Abbildung 17) beträgt 14 cm; die Länge 7 cm. Die Spulen sind aus reinem V-2 gebaut, d. h. sie besitzen keinerlei keramische Bauteile und können somit beliebig mit RF-, Ohm'sche Heizungs- oder sonstige Entladungen belastet werden. Bis jetzt sind nur zwei L-Spulen in Betrieb genommen worden und jede dieser zwei Spulen ist mit 400 W Impulsleistung im S-Band ($\Delta t = 2$ ms; $f = 2,4$ GHz) gespeist worden. Mit dieser, insgesamt 800 W, RF-Leistung war es möglich, ein fast vollionisiertes Wasserstoffplasma zu erzeugen. Typische Entladungsparameter sind: $P_{\text{OH}_2} \approx 5 \cdot 10^{-5}$ torr, $B_{\text{G}} \approx 10$ kG, $N_e \approx 5 \cdot 10^{12}$ cm $^{-3}$, $T_e \approx 10$ eV, $T_i \approx 5$ eV, $P_{\text{RF}} \approx 1$ kW, $f = 2,4$ GHz.

Excitation Frequency Range

$5 \cdot 10^8 \div 10^{10}$ Hz

Pulsed Input Power Limit

5 kWatts

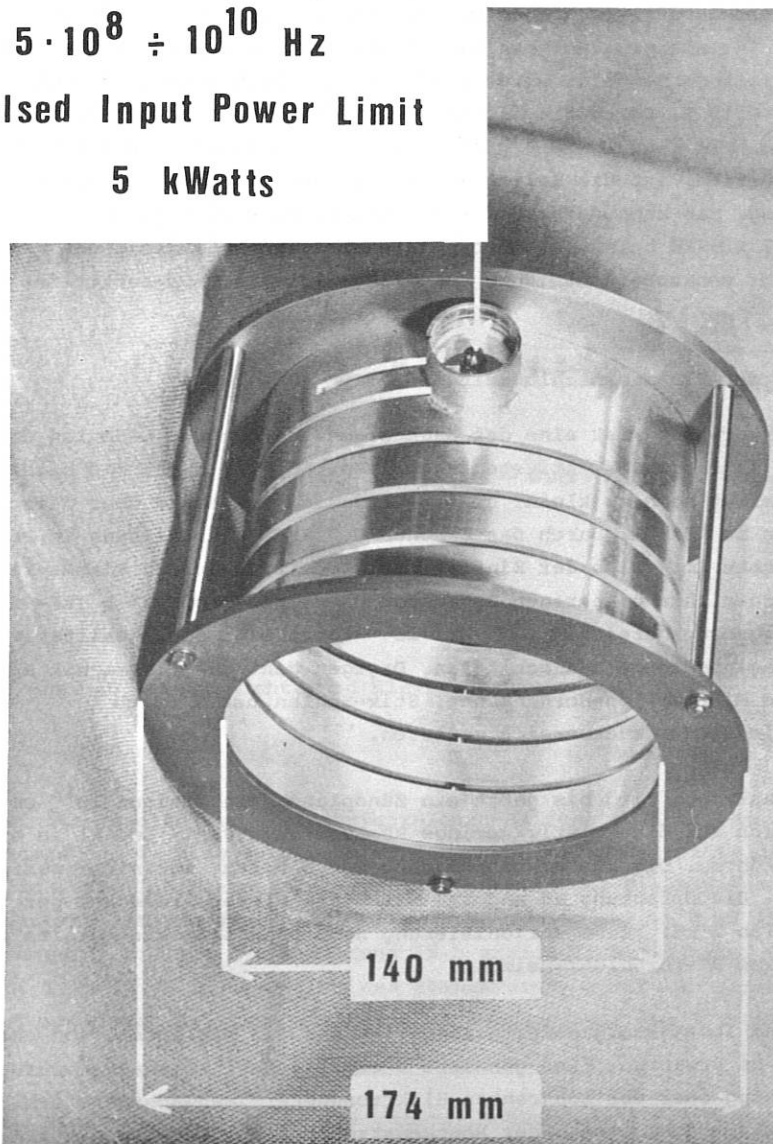


Abb. 17 L-Spule aus V-2 ohne keramische Bauteile

Einige Merkmale dieser RF-Entladung im Stellarator W II b sind:

1) Reproduzierbarkeit der OH-Entladung

Es ist bekannt, daß eine der Hauptschwierigkeiten der Ohm'schen Heizung (OH) die Reproduzierbarkeit der Entladung, insbesondere bei niedrigem Arbeitsgasdruck $P_0 < 10^{-4}$ torr, ist. Bei gleichzeitigem Ankoppeln der RF-Leistung mit der OH-Impulsspannung war es möglich, völlig reproduzierbare OH-Entladungen bis auf Neutralgasdruck von $3 \cdot 10^{-5}$ torr zu erreichen.

2) Wirkungsgrad - Verbesserung der OH-Entladung

Mit der OH-Hauptentladung (OH II) wurden im W II b Plasmadichtezahlen von $n_e \approx 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ und Elektronentemperaturen von $T_e \approx 100 \text{ eV}$ erzielt. Die im Plasma angekoppelte OH II-Leistung beträgt 5 bis 15 kW.

Gewöhnlich haben die Lufttrafosysteme (wie die des OH II) einen niedrigen Wirkungsgrad, so daß bei diesen Entladungsparametern eine primärseitige Impulsleistung von ca. 10 MW bei ca. 5 ms Impulslänge benötigt wird. Somit ist der Wirkungsgrad der OH II $\eta \approx 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,15 \%$. Durch die installierten 3-L-Spulen bietet sich die Möglichkeit, die RF-Leistung am W II b um 1 - 2 Größenordnungen zu erhöhen. Wie die Messungen an der Apparatur LISA beweisen, ist die Belastbarkeit der RF-Buchse im Wasserstoff höher als 5 kW Impulsleistung. Man kann deshalb die 3 L-Spulen am W II b mit einer RF-Leistung von insgesamt $P_{RF} > 3 \times 5 \text{ kW}$ belasten. Durch die erhöhte Leitfähigkeit des RF-vorionisierten Plasmas könnte sehr wahrscheinlich auch der Wirkungsgrad des OH-Lufttrafos verbessert werden.

3) Aufrechterhaltung der Plasmaeinschlußzeiten

Wie bereits früher erwähnt, ist eine der Haupteigenschaften der L-Spulen das Erhalten von Einschlußvermögen in fusionsorientierten Maschinen. Am W II b ist die bisher angewandte RF-Leistung vielleicht noch zu klein, um eine endgültige Aussage über diese L-Spulen-Eigenschaft machen zu können. Durch das Erhöhen der RF-Impulsleistung in Pegelhöhe von mehreren 10 kW könnte im W II b der Einfluß der RF-Heizung an der Plasma-Einschlußzeit genau studiert werden. Aus bisherigen Daten der RF-Heizung im W II b (RF-Entladungen im niedrigen Arbeitsgasdruckbereich $P_{OH2} \approx 2 \times 10^{-5}$ torr) kann man, qualitativ, auf die Erhaltung der Plasmaeinschlußzeiten schließen. Dagegen geht das Plasma mit anderen Heizungssystemen (wie Mikrowellen-Hornantenne, Stix-Spulen, usw.) durch Pump-out-Effekte im Niederdruckbereich verloren.

Zum Starten der RF-Entladung wird bis jetzt ein Zündplasma von einigen 10^{11} cm^{-3} benötigt. Dies ist wahrscheinlich auf die relativ geringe RF-Leistung ($P_{RF} \approx 800 \text{ W}$) in einem 100 l Vakuumgefäß zurückzuführen. Die RF-Leistungsdichte von 8 mW/cm^3 ist nicht ausreichend für eine Selbstentladung. Die Erfahrung an anderen Maschinen dieser Größe hat gezeigt, daß bei höherer RF-Leistung (ab 2 kW) keine Vorionisierung notwendig ist. Wie bereits oben erwähnt, handelt es sich um eine RF-Turbulenz-Heizung.

In der Elektronen- und Ionen-Energie-Verteilung ist deshalb ein Anteil von energetischen Elektronen und Ionen zu erwarten. Eine genauere Energieverteilungsanalyse würde die Frage der RF-Turbulenz-Heizung oder der kohärenten Elektronenenergiezuwachsrate erklären. Leider kann die bisher angewandte Meßmethode der Röntgenstrahlungsmessung nur qualitative Angaben über die Verteilung der Elektronenenergie liefern. Eine andere Eigenschaft des mit der L-Spule erzeugten RF-Plasmas war das Erhalten einer RF-Entladung, auch bei $\tau = 0$, d. h. der

Stellarator W II b wurde ohne Erregung der helischen Windungen betrieben. Praktisch wurde mit $\kappa = 0$ im Stellarator W II b auch die Möglichkeit der RF-Vorionisation im Tokamak-Betrieb erprobt. Bild 18 zeigt die Elektronendichte und die Elektronentemperatur bei $\kappa = 0$ und bei $\kappa = 0.1$. Bei $\kappa = 0$ ist die Entladungsröhre mit Wasserstoffplasma von $N_e \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ und $T_e \approx 10 \text{ eV}$ gefüllt, was für den Start einer Tokamak-Entladung bei $P_{H_2} \approx 10^{-5}$ bis 10^{-4} torr voll ausreichend ist.

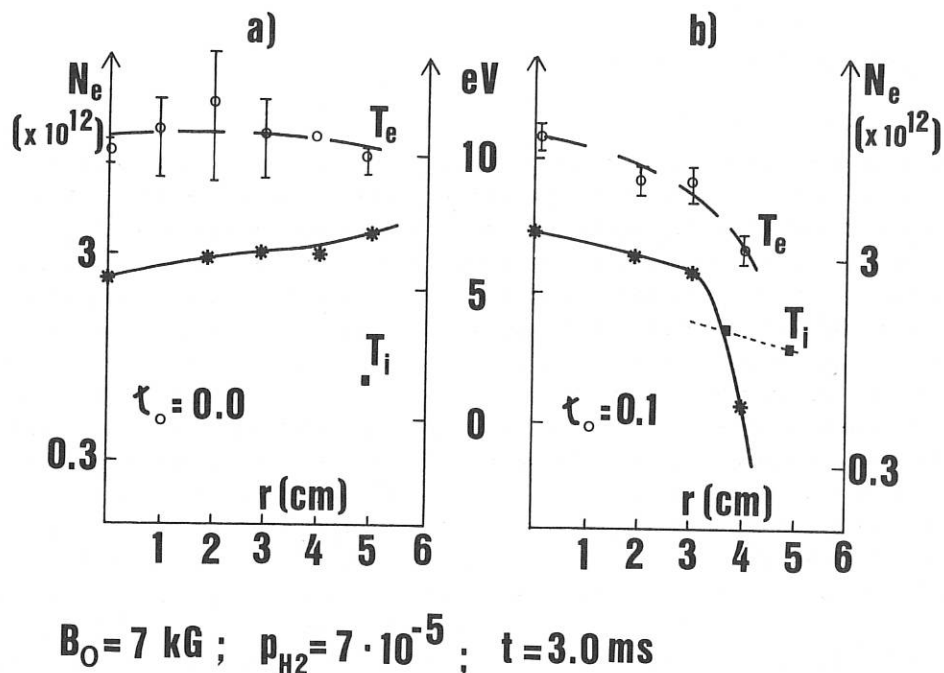


Abb. 18 Plasmadichte und Elektronentemperatur-Profil für a) $\kappa = 0,0$, b) $\kappa = 0,1$

Zum Schluß sei das Problem der RF-Turbulenz-Ionen-Heizung erwähnt. Man hat im W II b am Rande des Plasmas ca. 4 eV Ionentemperatur gemessen. Wegen der Größe der Ionensonde war es nicht möglich, die Ionentemperatur weiter innerhalb des Plasmakerns zu messen. Am selben Punkt der Ionentemperaturmessungen, d. h. am Plasmarand, wurden 7 eV für die Elektronentemperatur gemessen. Wie aus der Abbildung 18 b ersichtlich ist, steigt die Elektronentemperatur auf $T_e \approx 10 \text{ eV}$ in der Mitte des Plasmakerns. Nimmt man dasselbe Temperaturprofil für Elektronen und Ionen an, dann wäre eine Ionentemperatur von $T_i \approx 6 \text{ eV}$ in der Plasmamitte zu erwarten.

Bei der z. Zt. niedrigen Temperatur und relativ hohen Dichte des Plasmas im W II b sind die Relaxationszeiten von der Größenordnung von 1 ms; d. h. (im Vergleich mit einer Plasmaeinschlußzeit von 1/2 ms) man kann von einer stoßdominierten Heizung der Ionen reden.

Für eine stoßfreie RF-Turbulenz-Heizung der Ionen sollte man auf höhere Temperaturen, d. h. auf höhere RF-Leistung übergehen. RF-Leistungen von ca. 30 kW bis 50 kW im S-Band sind im IPP vorhanden und können kurzfristig am W II b eingekoppelt werden.

Erwähnenswert ist noch, daß die drei im W II b eingebauten L-Spulen einen sehr großen (von 100 MHz bis 20 GHz) Arbeitsfrequenzbereich besitzen. Man kann also im W II b ohne zusätzlichen Installationsaufwand RF-Heizungsstudien im Bereich der Ionen-, der Elektronen-Plasmafrequenz-, der Lower-Hybrid- und der RF-Turbulenzheizung unternehmen.

3.2.2. Toroidale Maschine "DINNAMMARE"

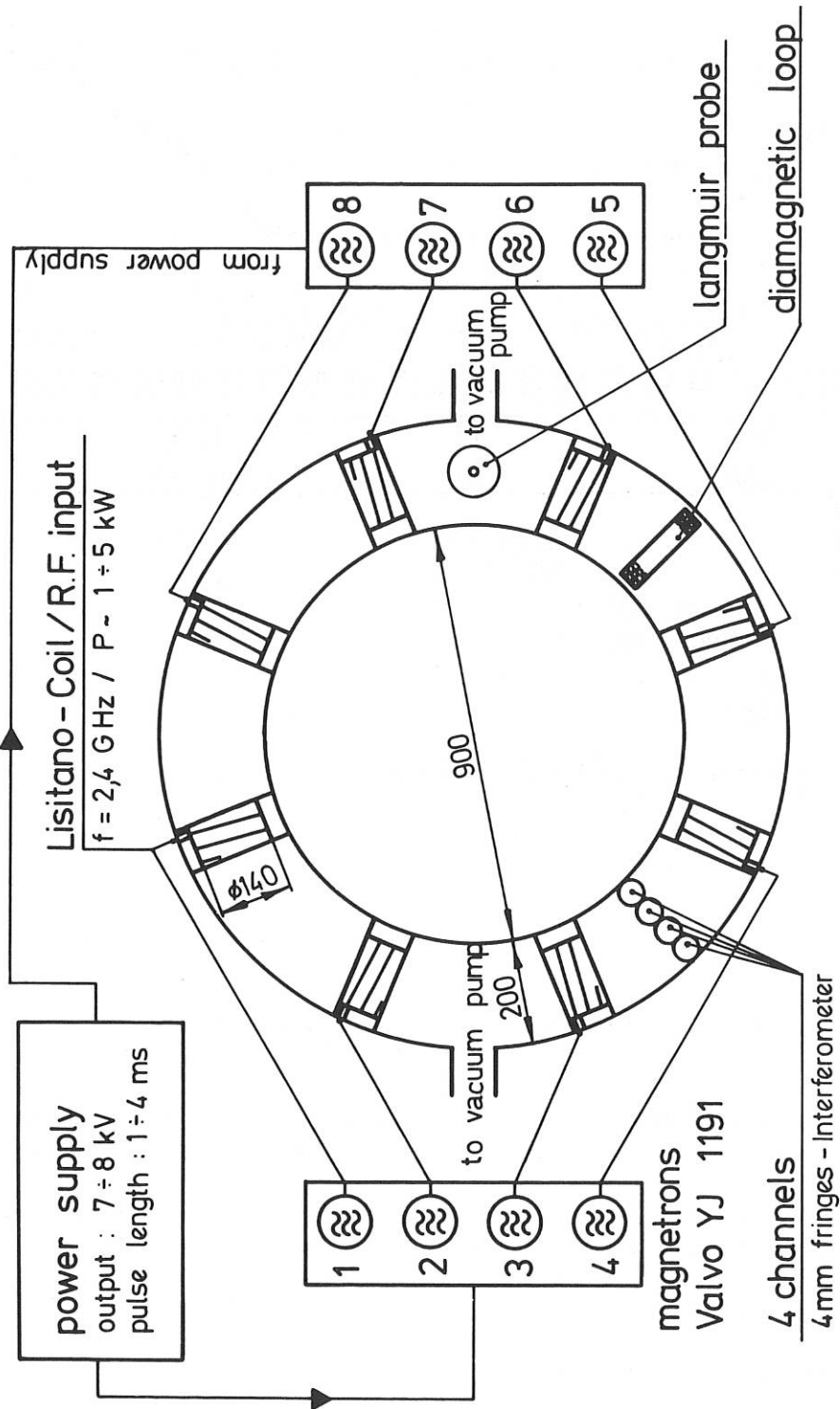
Die Messungen am Stellarator W II b haben gezeigt, daß es möglich ist, eine RF-Entladung bei $\tau = 0$ zu erhalten. In Zusammenarbeit mit D. Eckhardt wurde mit einem alten toroidalen Vakuumgefäß und einem alten Spulensatz, Sp-300, eine toroidale Maschine ohne helische Magnetfeldwindungen zusammengestellt. Der äußere und innere Radius dieses Torusgefäßes ($R = 55$ cm und $r = 10$ cm) sind die gleichen wie die des W II b. Wie in Abbildung 19 gezeigt, werden in diese Maschine 8 L-Spulen von dem selben Typ, wie für W II b gebracht, eingebaut. Jede dieser 8 L-Spulen wird mit 5 kW RF-Impulsleistung im S-Band gespeist. Alle 8 RF-Magneton-Generatoren werden für eine RF-Impulsleistung von 40 kW parallel (durch einen von F. Lindenberg und H. Berger entwickelten Zentralimpuls-Modulator) betrieben. Bedingt durch die Belastbarkeit der magnetischen Feldspulen ist die erreichbare Magnetfeldstärke auf der Torusseule auf $B = 10$ kG begrenzt. Mit der Inbetriebnahme dieser Maschine im Frühjahr 1973 wird ein RF-Plasma von folgenden Parametern erwartet: $N_e \approx 10^{13}$ cm⁻³, $T_e \approx 80$ eV, $T_i \approx 30$ eV, $B = 10$ kG, $P_{H_2} \approx 3 \times 10^{-5}$ torr. Aufgrund magnetoelektrischer Confinement-Effekte (siehe Jahresbericht 1970, Seite 64 ff) wird eine Plasmaeinschlußzeit von ca. 1/4 ms erwartet. Diese Plasmaparameter sind von Interesse für die RF-Heizungsstudien im Hinblick auf die Verwendung an größeren fusionsorientierten Maschinen, wie Pulsator und W VII. Wie zuvor beschrieben, erlaubt die große Frequenzbandbreite der eingebauten 8 L-Spulen verschiedene RF-Hochleistungsexperimente in den wichtigsten Frequenzbereichen der RF-Heizung, wie Elektronenplasma, Ionenplasma- und Lower-Hybrid-Frequenz. Mit einer Impulsleistungsgrenze von 10 bis 20 kW für jede RF-Buchse sollte es möglich sein, RF-Plasmaheizungsexperimente mit 100 kW bis 200 kW Gesamtimpulsleistung durchzuführen.

Außer für RF-Heizungsexperimente wird die Maschine "DINNAMMARE" für die Entwicklung von verschiedenen diagnostischen Verfahren für Tokamak "Pulsator" benutzt.

Es sei noch erwähnt, daß die Möglichkeit der raschen Zusammensetzung und Auseinandernahme dieser Maschine die weitere Entwicklung von leistungsfähigeren RF-Buchsen und RF-Strukturen für die Verwendung an fusionsorientierten Experimenten im IPP ermöglicht.

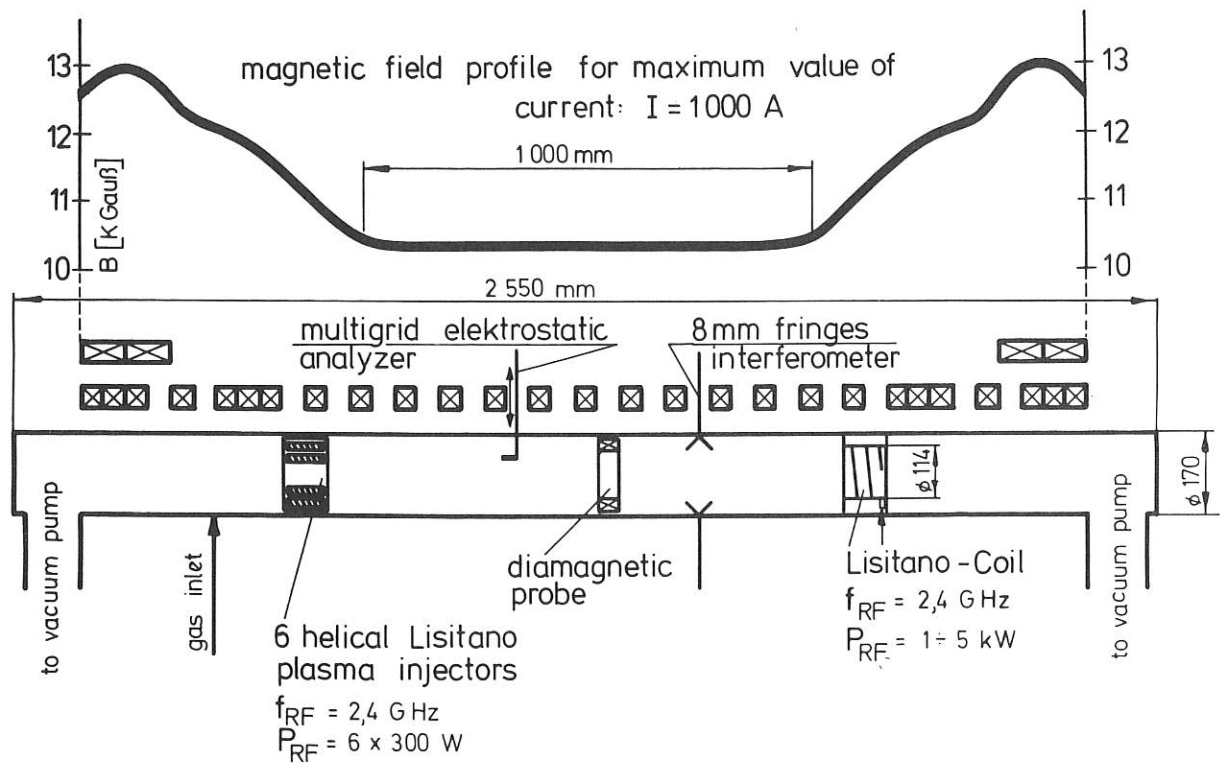
3.2.3. LISA-Maschine

Die in Abbildung 20 schematisch dargestellte Maschine ist eine lineare Spiegel-Apparatur (LISA) mit einer Gesamtlänge von $L = 2,5$ m und einem homogenen Anteil der Magnetfeldstärke in der Mitte der Maschinen, dessen Länge 1 m beträgt. Die maximale Feldstärke des homogenen Anteils kann in Dauerstrich bis 10,5 kG, das Spiegelfeld bis 13 kG betrieben werden.



toroidal machine „DINNAMARE“

Abb. 19 Schematische Skizze der Maschine "DINNAMARE"



Li near - Spiegel - Apparatur „LISA“

Abb. 20 Schematische Skizze der LISA-Maschine

Die Hauptaufgabe der LISA-Maschine ist die Entwicklung neuartiger Plasmaquellen für die unmittelbare Verwendung an fusionsorientierten Experimenten des IPP.

Zur Zeit ist die Entwicklung von diesen Plasmaquellen für drei Verwendungsmöglichkeiten vorgesehen: i) Plasmafüllung großer Maschinen, ii) Plasmaquelle für "Fast-Neutral Injection" Heating und iii) RF-Strukturen für Plasmaheizung. Im folgenden wird über diese Entwicklungsarbeiten berichtet:

i) Plasmafüllung mittels Mikrowellen-Guns

Wegen des niedrigen Wirkungsgrades der mit Lufttrafo ausgestatteten Ohm'schen Heizung und wegen des langsamen Aufbaus der Plasmadichte mit den Neutral-Injection-Systemen ist es unentbehrlich, große fusionsorientierte Experimente (wie z. B. W VII, Pulsator II

und Belt-Pinch) mit einem "Target"-Plasma hoher Dichte und kleinstem neutralen Restgasdruck zu füllen.

Ein zur Füllung großer Maschinen entwickeltes "Mikrowellen-Gun-System" wurde im IPP-Jahresbericht 1970 auf Seite 66-68 bereits beschrieben.

Dieses System ist weitgehend verbessert worden. Zur Zeit werden Wasserstoffentladungen in folgendem Parameterbereich erreicht: $P_{RF} \approx 1 \text{ kW}$, $B = 12 \text{ kG}$, $N_e \approx 5 \cdot 10^{12}$, $T_e \approx 20 \text{ eV}$, $P_{H_2} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ Torr}$. Im Vergleich zu den konventionellen helischen L-Spulen von Abbildung 7 und Abbildung 17 kann man mit dieser neuen Quelle in einem niedrigen (um einen Faktor 2-3) Neutralgasdruckbereich arbeiten. Mit Hilfe schneller Impulsgasventile und eines Volumengetter-Systems wird z. Z. versucht, den restlichen neutralen Gasdruck während der Füllung der Maschine weiter herabzusetzen. Die Erfahrung mit konventionellen L-Spulen am W II b hat gezeigt, daß der Arbeitsgasdruck in toroidalen Vakuum-Systemen wesentlich niedriger ist, als in linearen Maschinen, so daß möglicherweise mit Hilfe dieses neuen "Mikrowellen-Gun-Systems" ein akzeptables Targetplasma für Stellaratoren und Tokamaks zu erreichen ist.

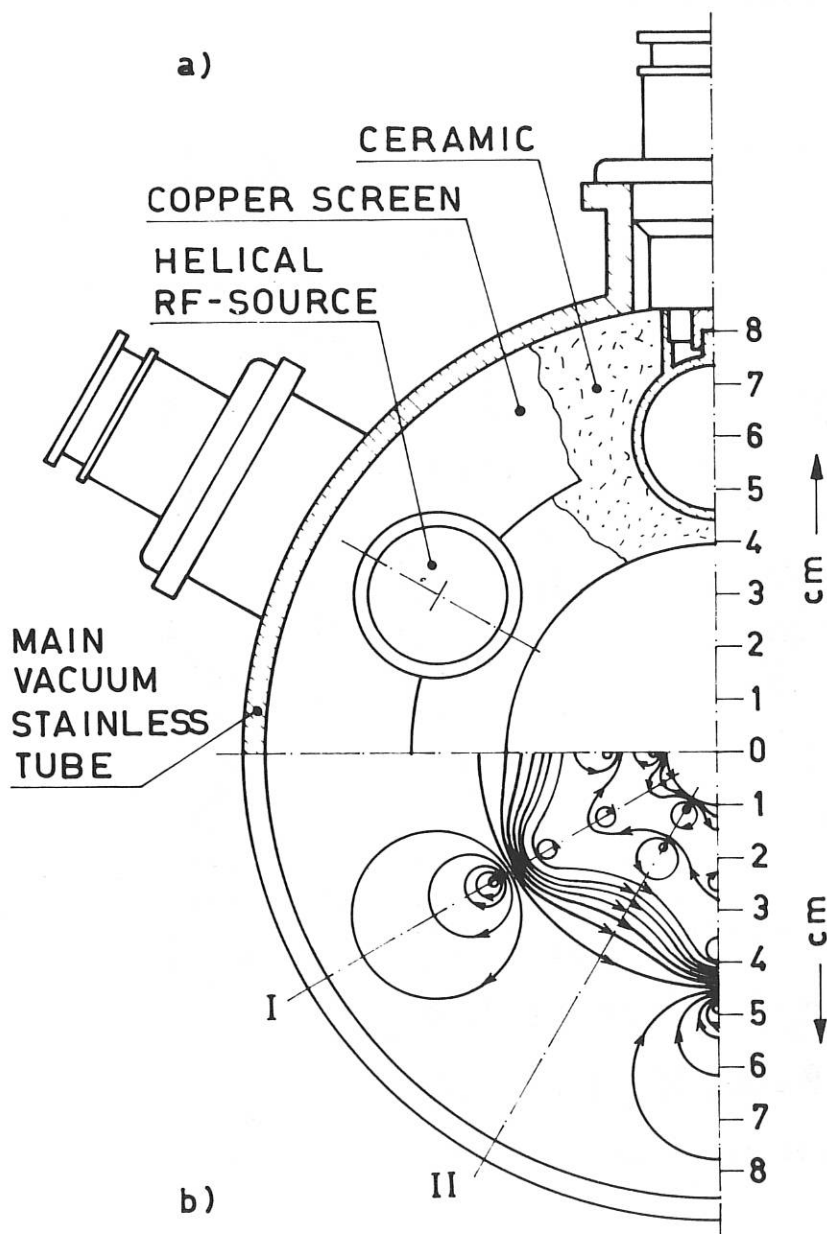


Abb. 21 Strömungslinien um den Plasmakern herum

Aus umfangreichen Profilmessungen in mehreren Radialrichtungen der Elektronendichtezahl, der Elektronentemperatur, des Plasma- und Floatingpotentials ist eine laminare Plasmaströmung um den Plasmakern herum zu erkennen. Diese Strömung wird von der RF-Feldstärke kontrolliert, wickelt sich durch Viskosität in Wirbeln am Plasmarand und bricht dort in Turbulenz bei erhöhter RF-Leistung ab. Abbildung 21 zeigt qualitativ die Strömungslinien um den Plasmakern herum.

Die RF-Turbulenz stellt keine erkennbare Grenze für die weitere RF-Heizung des Plasmas dar. Wie in Abbildung 22 gezeigt, bildet sich eine ringförmige Plasmapotential-Senke und ein konzentrisch zu dieser Senke positiver Plasmapotentialring dicht um den Plasmakern.

Aus dieser Plasmapotentialsenke und ringförmigen Quelle ist eine magnetoelektrische Begrenzung der Ionen und der Elektronen in der Nähe der Plasma-Achse zu erkennen. Gelingt es, diese scharfe radiale Plasmabegrenzung auch bei sehr niedrigem Neutralgasrestdruck aufrechtzuerhalten, dann kann dieses Mikrowellen-Gun-System den jetzigen materiellen Limiter in toroidalen Maschinen ersetzen. Das fehlende Neutralrestgas und die sehr niedrige Plasmadichte am äußeren Plasmarand würden dann durch die verminderte Leitfähigkeit des Restgases wesentlich weniger Leistungsverlust der Ohm'schen Heizung an der Stelle des jetzigen Plasmalimiters hervorrufen.

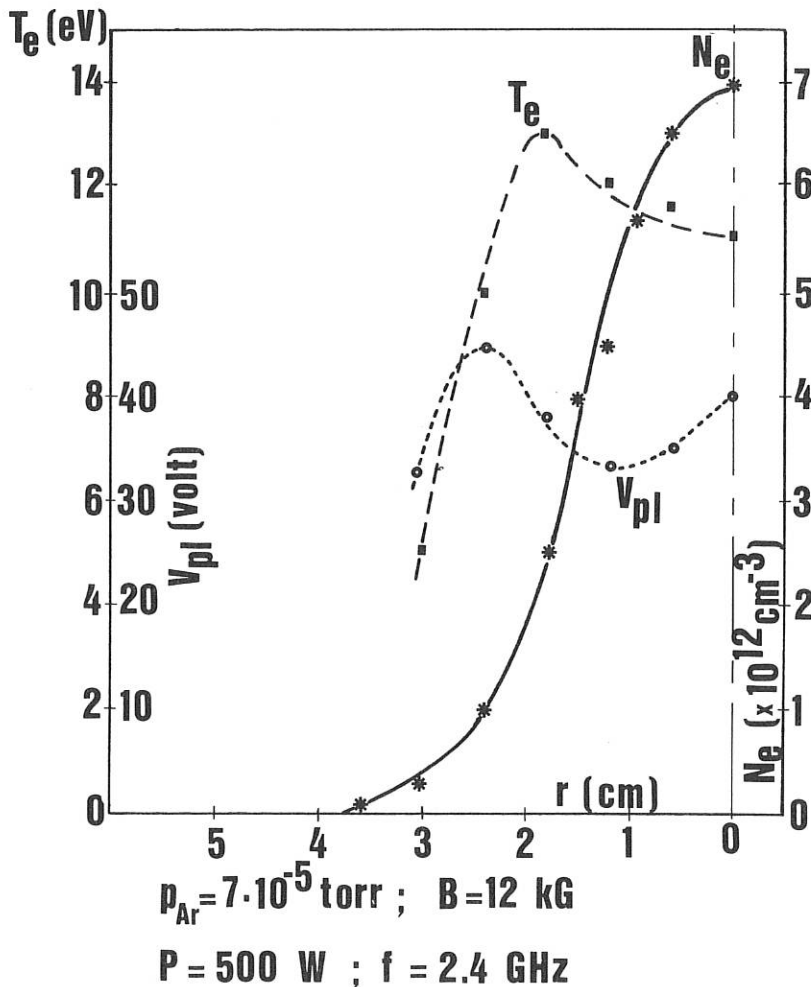


Abb. 22 Ringförmige Senke und Quelle des Plasmapotentials

b) Plasmaquelle für "Fast-Neutral Injection" Heating

Um einen Überblick über die notwendigen Leistungspegel für den schnellen Neutral-Einschluß zu bekommen, sollte man bedenken, daß für einen Tokamak der Größe eines Cleo, Pulsators oder Petula ($R \approx 70-90$ cm, $r \approx 10-20$ cm) ca. 100 kW Strahlleistung benötigt werden, um die Anfangstemperatur der Ionen um 10 % zu erhöhen (z. B. von 300 eV bei $N \approx 10^{13}$) /1/.

Man ist deshalb bestrebt, stabile Ionenquellen von höherer Leistungsstrahldichte mit geringem Anteil an Restneutralgas und Verunreinigungen zu entwickeln.

In Zusammenarbeit mit G. Schilling wird experimentell untersucht, ob es für den Neutral-einschluß von Vorteil ist, die übliche Plasmaquelle des Typs "DuoPIGatron" in einem Ionenbeschleuniger durch eine L-Quelle zu ersetzen. Die Quelle sollte ein Wasserstoffplasma hoher Dichtezahl ($N \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) ziemlich uniform (± 10 %) über einen großen Plasmaquerschnitt ($s > 100 \text{ cm}^2$) produzieren.

Für diesen Zweck wird das in Abbildung 23 gezeigte Mikrowellen-Gun-System mit weiteren 10 Guns (also insgesamt 16) ergänzt. Die Quelle wird mit insgesamt 5 x 16 kW bis 10 x 16 kW Impulsleistung im S-Band gespeist.

/1/ Report CIM-P 314 (1972)

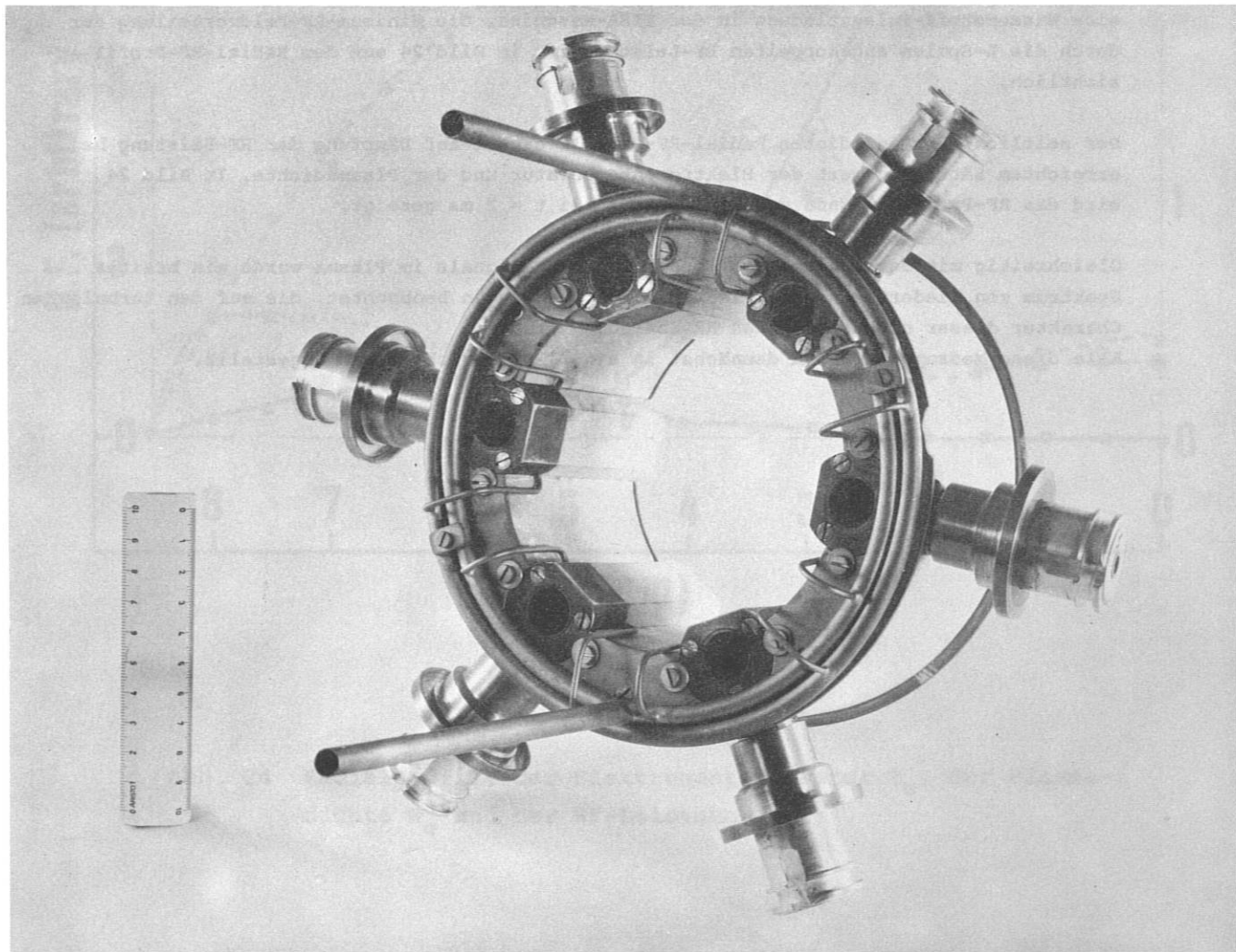


Abb. 23 Mikrowellen-Gun-System

Diese Plasmaquelle wird dazu dienen, der üblichen Mehrgitter-Beschleunigungsstrecke ein optimales Plasma zu liefern.

Wir erwarten hiervon folgende Vorteile:

- 1) ein flaches Plasmadichteprofil über dem ersten Extraktionsgitter, d. h. bessere Beleuchtung der Beschleunigungsstrecke,
- 2) keine Modulation des Ionenstrahles durch Plasmadichteschwankungen, wie sie durch Instabilitäten im DuoPIGatron vorkommen,
- 3) eine Reduzierung des aus der Plasmaquelle in Richtung Einschlußexperiment strömenden Neutralgases um mehrere Größenordnungen, welches die Anwendung der Querstrahlneutralisation ermöglicht und hierdurch die injizierte Gasmenge erheblich reduziert.

Experimentell zu untersuchen wäre der mögliche Einfluß von RF-Feldern und eines geringen Axialmagnetfeldes auf die Hochspannungsstabilität der Beschleunigungsstrecke.

c) RF-Strukturen für Plasmaheizung

Die früher erwähnte RF-Turbulenz-Heizung bezieht sich auf umfangreiche Wellenmessungen, die für die Entwicklung der RF-Strukturen ausgeführt wurden. Nachdem sich erwiesen hat, daß sich nur ein winziger Anteil der RF-Energie in Whistler-Moden umgewandelt hat (siehe Jahresbericht IPP 1970, Seite 68), wurde versucht, eine bessere Einsicht in die Wellenabsorptionsmechanismen zu gewinnen.

Bild 24 zeigt die Elektronentemperatur-Plasmadichte und RF-Leistungs-Radialprofile für eine Wasserstoff-Pulsentladung in der LISA-Maschine. Die Minimum-RF-Feldverteilung der durch die L-Spulen angekoppelten RF-Leistung ist in Bild 24 aus dem Radial-RF-Profil ersichtlich.

Der zeitliche Verlauf dieses Radial-RF-Profiles deutet auf Dämpfung der RF-Leistung bei erreichtem Sättigungswert der Elektronentemperatur und der Plasmadichte. In Bild 24 wird das RF-Profil am Ende des RF-Impulses bei $t = 2$ ms gezeigt.

Gleichzeitig mit der Abnahme des Hochfrequenz-RF-Signals im Plasma wurde ein breites Spektrum von niederfrequenten Plasmadichteschwankungen beobachtet, die auf den turbulenten Charakter dieser nichtresonanten RF-Entladung deutet.

Alle diese Messungen werden demnächst in einem IPP-Bericht zusammengestellt.

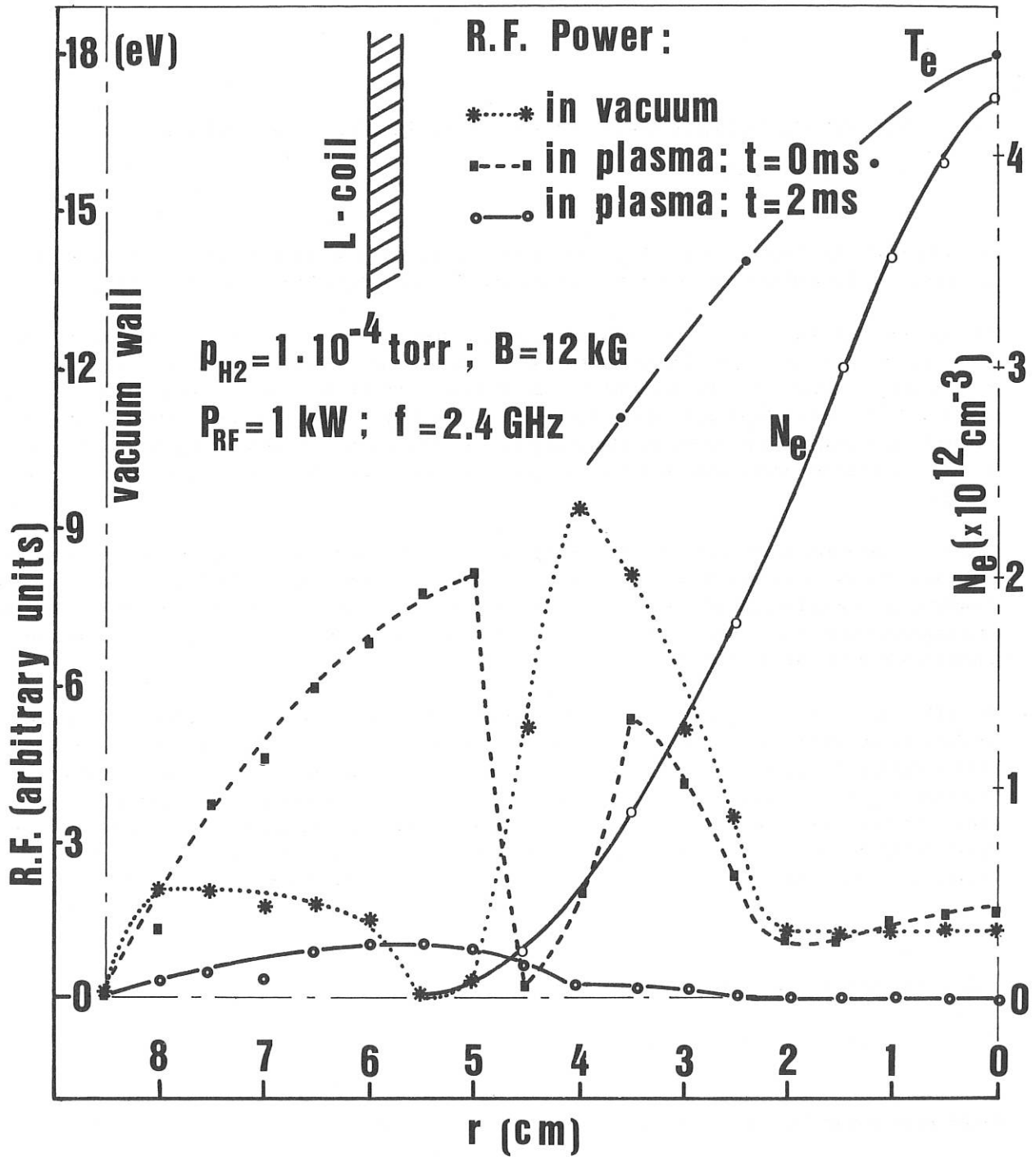


Abb. 24 Radialprofile der Elektronentemperatur T_e , der Plasmaidichte N_e und der RF-Leistung

4. Sonstige Untersuchungen

4.1. Theoretische und numerische Untersuchungen der Echelette-Gitterbeugung

(S. Sesnic, F. Pohl)

Der Zweck dieser Untersuchungen ist, den Wirkungsgrad des Echelette-Gitters in einem Monochromator zu optimieren und neue Anwendungen für das Echelette-Gitter zu finden.

Die Theorie der dreidimensionalen Echelette-Gitterbeugung wurde entwickelt. Die Theorie besteht darin, daß man das Randwertproblem der Gitterbeugung in zwei Randwertprobleme aufteilt. Ein Randwertproblem betrifft die fortplanzenden und evaneszenten Wellen oberhalb der Gitterebene und das andere Randwertproblem die stationären Wellen innerhalb der Gitterfurchen. Man bekommt zwei Systeme von linearen Gleichungen, die dann durch die Randbedingung auf der Gitterebene gekoppelt sind. Man kann dieses System der linearen Gleichungen dann numerisch auswerten.

Das wichtigste Ergebnis dieser Untersuchung ist, daß man, im Gegensatz zu dem zweidimensionalen Fall, wo es zu keiner Polarisationskopplung kommt, im dreidimensionalen Fall eine starke Kopplung zwischen P- und S-Wellen findet. Um das Gitter durch die Änderung von verschiedenen Gitterparametern untersuchen zu können, ist eine numerische Methode, die diese Untersuchungen ermöglichen soll, in der Entwicklung.

Im Falle sowohl von zwei- wie auch dreidimensionalen Gittern sind neue Anomalien gefunden worden. Diese kommen vor, wenn die Phasendifferenz über einer Furche einem entweder geraden oder ungeraden Vielfachen von $\pi/2$ gleicht. Dadurch entstehen zwei neue Typen von Anomalien. Die neue "gerade" Anomalie kann nur mit der doppelten Rayleigh-Anomalie zusammenfallen, was dann eine besonders starke Anomalie bewirkt. Im Fall des zweidimensionalen Gitters kann man diese dreifache Koinzidenzanomalie auf einen Laserhohlraum anwenden, weil sich unter bestimmten Bedingungen die meiste Leistung in der rückwärts gestreuten Ordnung befindet.

4.2. Extreme CO₂-Laser-Vorwärtsstreuung

(J. Fujita, N. Heckenberg, F. Pohl, S. Sesnic)

Siehe entsprechenden Bericht der Experimentellen Abteilung 4.

4.3. Metallurgische Arbeiten

(H. Wulff)

Das plasmachemisch gewonnene Titan wurde zusammen mit käuflichem Titan von Herrn Liebl mit der Mikrostrahlsonde untersucht. Außer Sauerstoff enthielt es keine Verunreinigungen. Der Sauerstoffgehalt war etwa halb so groß wie in der Probe des käuflichen Titans.

Das System der Bewegungsgleichungen der im Plasmahochofen umzusetzenden Teilchen wurde numerisch integriert (J. Steuerwald). Die Rechnungen geben Einsicht in die Abhängigkeit der Verweilzeit im Plasma von der Teilchengröße, der Temperatur des Plasmas usw.

EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 4

(Dr. S. Witkowski)

Neben den Schwerpunkten Plasmaerzeugung durch Laser und Heizung durch Plasmawellen wurden die Arbeiten auf dem Gebiet der magnetohydrodynamischen Energiewandlung fortgesetzt und experimentell im wesentlichen abgeschlossen.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen der Edelgas-MHD-Generatoren standen die Fragen des Verhaltens bei höheren Drücken, die bei der Verwendung von Kernreaktoren als Wärmequelle auftreten. Durch einen Umbau der vorhandenen Experimentieranlage konnten die interessierenden Plasmaparameter, vor allem die elektrische Leitfähigkeit, im Druckbereich bis zu 8 bar gemessen werden. Die Ergebnisse machten es möglich, zwischen den verschiedenen vorliegenden Theorien zu entscheiden und erlauben ausserdem eine zuverlässigere Extrapolation der Skalierung in den Bereich noch höherer Drucke. Aus diesen Ergebnissen, aus den ergänzenden Untersuchungen zur Unterdrückung der Ionisationsinstabilitäten, aus eigenen theoretischen Arbeiten und aus weiteren Informationen geht hervor, dass eine Temperatur von etwa 2000 K für das Arbeitsmittel nicht wesentlich unterschritten werden darf, wenn ein Edelgas-MHD-Generator wirtschaftlicher als konventionelle Energiewandlersysteme arbeiten soll. Da nach Auskunft verschiedener Reaktorspezialisten Kernreaktoren mit Austrittstemperaturen der gewünschten Höhe in absehbarer Zeit nicht verfügbar sein werden, werden die Arbeiten an Edelgasgeneratoren zunächst nicht weitergeführt.

Auf dem Verbrennungs-MHD-Generator-Gebiet wurden umfangreiche Messserien am Experimentiergenerator durchgeführt, deren Ergebnisse zusammen mit theoretischen Untersuchungen zu Skalierungsgesetzen führten, die als Grundlage für die Auslegung und Optimierung eines 10 MW-Prototyp-Generators dienten. Daneben wurden die Fragen der Anwendung und der Wirtschaftlichkeit von MHD-Generatoren als Sofortreserve in der öffentlichen Energieversorgung weiter studiert. Dabei stellte sich heraus, dass eine ganze Reihe von Anwendern Interesse an MHD-Sofortreserveaggregaten zeigte. Trotzdem erkannte das BMBW dem Bau eines 10 MW-Prototypengenerators, der auf den ersten Projektabschnitt folgen sollte, nicht die ausreichende Priorität für eine Förderung gegenüber anderen Vorhaben zu, sodass die Arbeiten am Verbrennungs-MHD-Generator mit Ablauf des Jahres 1972 eingestellt werden mussten.

Die Aussichten für einen Laser-Fusionsreaktor sind nach neueren theoretischen Ergebnissen sehr viel günstiger geworden. Das Prinzip eines Reaktors mit Trägheitseinschluss tritt nunmehr als eine weitere vielversprechende Möglichkeit neben die Reaktoren mit magnetischem Einschluss des Plasmas. Die Arbeiten auf diesem Gebiet wurden deshalb im Jahre 1972 verstärkt durchgeführt. Das eine der wichtigsten Probleme auf dem Wege zum Laser-Fusionsreaktor, die Frage der Absorption des Laserlichts bei hohen Intensitäten, wurde sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht, während die zweite wichtige Frage, die sphärische Kompression eines Brennstoffteilchens, zunächst nur numerisch angegangen werden konnte.

Die überraschend guten Ergebnisse mit dem Jodlaser zeigten, dass in diesem Lasertyp ein Potential als Hochleistungslaser steckt, der ihn zu einem Konkurrenten des Neodym-Glaslasers macht. Es wurde deshalb die Entwicklung einer 1 kJ-Jodlaser-Anlage begonnen, die nach ihrer Fertigstellung im Jahre 1974 für die Untersuchung der Absorption und Reflexion des Laserlichts bei hohen Intensitäten verwendet werden soll. Neben dem Aufbau eines 100 J-Bausteines als Vorstufe zu der grossen Anlage wurden die mehr grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiete chemischer Laser weitergeführt.

Bei den Plasmawellen trat im Berichtsjahr das Studium der unteren Hybridfrequenz in den Vordergrund. Rechnungen haben gezeigt, dass bei Einschluss von Hochfrequenz und Plasma in koaxialer Anordnung praktisch die gesamte Hochfrequenzleistung im Plasma absorbiert werden sollte. Eine experimentelle Überprüfung dieser theoretischen Voraussagen wurde vorbereitet. Neben den Heizexperimenten wurde wieder ein erheblicher Teil der Aktivitäten in Fragen der Plasmadiagnostik mit Infrarotlasern investiert. Sowohl auf dem Gebiete des Homodynempfangs von gestreutem CO_2 -Laserlicht als auch des Heterodynempfangs von HCN-Laserstrahlung wurden theoretisch und experimentell ermutigende Fortschritte erzielt.

1. Edelgas-MHD-Generatoren

Die im IPP seit 1962 durchgeführten Untersuchungen an Edelgas-MHD-Generatoren hatten das Ziel zu prüfen, ob mit solchen Generatoren in Kernkraftwerken der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von thermischer Energie in elektrische erhöht werden kann. Frühere Untersuchungen, die jedoch bei niedrigeren Drücken (1 bar) gemacht wurden, als sie ein Kernreaktor erfordert, ergaben, dass ein Edelgas-MHD-Generator prinzipiell wie theoretisch erwartet arbeitet (Jahresbericht 1970).

Im Berichtsjahr wurde geprüft, ob auch bei höheren Drücken, wie sie durch den Reaktor bedingt sind, eine effektive Energiewandlung möglich ist. Hierzu wurde die diesen Prozess wesentlich bestimmende Grösse, nämlich die effektive elektrische Leitfähigkeit unter MHD-Generatorbedingungen im Druckbereich bis zu 8 bar gemessen. Ausserdem wurde versucht, durch Vollionisation des Seedmaterials die die Effektivität des Generators beeinträchtigenden Ionisationsinstabilitäten zu unterdrücken.

Die Messungen ergaben in Übereinstimmung mit Berechnungen, dass unter Kernreaktorbedingungen eine Temperatur des Arbeitsmittels im Bereich von 2000 °K erforderlich ist, um mittels des MHD-Generators eine wirtschaftlichere Energiewandlung als mit den bisherigen konventionellen Anlagen zu erreichen.

Da aber frühestens in 20 bis 30 Jahren Kernreaktoren zur Verfügung stehen könnten, die das Arbeitsmittel auf die erforderliche Temperatur aufheizen, wurde beschlossen, die Arbeiten auf dem Gebiet der Edelgas-MHD-Generatoren einzustellen, bis die Aussichten, Kernreaktoren mit entsprechend hohen Gasaustrittstemperaturen bauen zu können, kurzzeitiger realisierbar sind.

1.1. Untersuchung der effektiven elektrischen Leitfähigkeit und der Elektronentemperatur unter MHD-Generatorbedingungen im höheren Druckbereich

(G. Brederlow, K.J. Witte)

Die Untersuchungen hatten das Ziel festzustellen, welche der verschiedenen Theorien, die den Einfluss der Ionisationsinstabilitäten auf die elektrische Leitfähigkeit beschreiben, am besten mit den experimentellen Werten übereinstimmt. Es sollten so die "scaling laws"

für die elektrische Leitfähigkeit zur Berechnung von Kraftwerks-MHD-Generatoren erhalten werden.

Die Messungen wurden in einem Argon-Kalium-Plasma unter MHD-Generatorbedingungen (gekreuzte elektrische und magnetische Felder) durchgeführt, wobei die einzelnen Parameter in weiten Bereichen variiert wurden ($0 < j \leq 10 \text{ Amp/cm}^2$; $0 < B \leq 5 \text{ Tesla}$; $1 \leq p \leq 8 \text{ bar}$).

Die effektive elektrische Leitfähigkeit wurde aus den gemessenen Feldstärke- und Stromdichtevektoren und dem Winkel zwischen beiden bestimmt. Die Feldstärke ist mittels elektrostatischer Sonden ermittelt worden, während sich die Stromdichte aus dem durch den bekannten Querschnitt fliessenden Gesamtstrom ergab. Die Stromrichtung konnte durch Bildwandleraufnahmen festgestellt werden, da die Richtung der als "streamer" bekannten Entladungsstrukturen mit der Stromrichtung zusammenfällt.

Die Elektronentemperatur wurde gemessen, indem die Lichtemission im Flügel einer Kaliumresonanzlinie bestimmt wurde. Die so erhaltenen Messwerte wurden kalibriert, indem die Gastemperatur mit einem Thermoelement ermittelt wurde, ohne dass ein Strom im Plasma floss ($T_e \approx T_g$).

Die Messungen ergaben, dass im untersuchten Parameterbereich die effektive elektrische Leitfähigkeit durch die von Solbes¹⁾ angegebene Beziehung in guter Annäherung beschrieben wird. Die durch die Ionisationsinstabilitäten verursachte Elektronentemperaturerhöhung entsprach im Rahmen der Messgenauigkeit ebenfalls der theoretisch erwarteten. Aus diesen Messergebnissen folgt, dass in MHD-Kernkraftwerken eine Temperatur des Arbeitsmittels im Bereich von $2000 \text{ }^\circ\text{K}$ erreicht werden muss, um den Gesamtwirkungsgrad bei der Energiewandlung auf über 50 % zu erhöhen.

1.2. Unterdrückung der Ionisationsinstabilität durch Vollionisation des Seedzusatzes

(T. Nakamura)

Frühere Untersuchungen (Jahresbericht 1971) haben bereits gezeigt, dass die Ionisationsinstabilitäten in einem Argon-Caesium-Plasma unterdrückt werden können, wenn der Seedzusatz vollständig ionisiert wird. Abschätzungen ergaben, dass mit dieser Stabilisierungsmethode die elektrischen Verluste im Generator reduziert und damit die Leistungsdichten vergrössert werden können.

¹⁾ A. Solbes: "Quasilinear Plasma Wave Study of Electrothermal Instabilities", Electricity from MHD, Vol. I, pp. 499 - 518 (1968)

Stabilitätsuntersuchungen, die an anderen Stellen ¹⁾ und ²⁾ mit He-Cs-Gemischen durchgeführt wurden, zeigten jedoch negative Ergebnisse. Da aber He-Cs-Gemische als Arbeitsmittel für MHD-Generatoren von grosser Bedeutung sind, sollte deshalb auch hier ein solches Gemisch unter den in unserer Versuchsapparatur exakt einstellbaren Bedingungen untersucht und die Richtigkeit der in ¹⁾ und ²⁾ gemachten Aussagen überprüft werden.

Die Messungen wurden in einem strömenden Helium-Caesium-Plasma in einem simulierten Faraday-Generator, bei dem der Stromfluss im wesentlichen durch äussere elektrische Felder bewirkt wurde, durchgeführt. Die Gastemperatur betrug 1000 °K, der Gasdruck 0,2 bar und der Seedzusatz lag im Bereich von 5×10^{-3} %.

Die Messungen ergaben, dass im Bereich der Vollionisation des Seedzusatzes die effektive elektrische Leitfähigkeit innerhalb der Messgenauigkeit mit der skalaren übereinstimmte, und dass der Hallparameter keine Sättigungserscheinungen zeigte. Diese Tatsachen beweisen, dass auch in einem Helium-Caesium-Plasma die Ionisationsinstabilitäten unterdrückt werden können.

Obgleich mit dieser Stabilisierungsmethode das Generatorverhalten verbessert werden kann, müssen doch noch Arbeitstemperaturen bis zu 2000 °K erreicht werden, um Gesamtwirkungsgrade über 50 % zu erzielen.

1.3. Theoretische Arbeiten über Nichtgleichgewichts-MHD-Generatoren

(L.L. Lengyel)

Die Arbeiten im Berichtsjahr betreffen im wesentlichen die Vorbereitung von drei Abschlussberichten über: a) Elektromagnetische Feldverteilungen und Entladungsstrukturen in Nichtgleichgewichts-MHD-Plasmen, b) Grundlagen der kinetischen Theorie von Nichtgleichgewichts-MHD-Plasmen, c) Experimenteller Nachweis der Möglichkeit der Kompensation des Hall-Effektes und der Steuerung der Stromverteilung auf den Elektrodenoberflächen mittels einer Kaskadenwiderstandsanordnung. Die zu c) notwendigen Experimente wurden mit Hilfe von InSn-Halbleiterplättchen in der Abteilung Physik der Technischen Universität Miskolc, Ungarn, ausgeführt.

-
- 1) Belousov, V.N., Eliseev, V.V., Shipuk, I.Ya., Proc. of the IAEA Symp., Salzburg, Bd.2, 323 - 334 (1966)
- 2) Kerrebrock, J.L., Solbes, A., Oliver, D.A., Grove, R.E., Progress Report 28 (1971), MIT Space Prop. Lab.

2. Kurzzeit-MHD-Generator

Nachdem im Jahre 1971 vorwiegend die Plasmaströmung ohne Magnetfeld untersucht wurde, waren die Arbeiten des Jahres 1972 vor allem dem Studium der Energieumwandlung im MHD-Generator gewidmet. Das Experimentierprogramm wurde von theoretischen Arbeiten und technischen Entwicklungen begleitet. Mit den Untersuchungen wurden die baureifen Unterlagen für einen Prototypgenerator erarbeitet, die das Ziel des ersten Projektabschnittes darstellten. Einen wesentlichen Anteil des Programmes stellte das Studium der Anwendungsmöglichkeiten von Kurzzeit-MHD-Generatoren dar. Ausserdem beteiligte sich die Arbeitsgruppe an der Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Langzeit-MHD-Generatoren. Die damit befasste Studiengruppe, die aus Mitarbeitern verschiedener Institute und Firmen bestand, erarbeitete einen Bericht über "Die Wirtschaftlichkeit von Verbrennungs-MHD-Kraftwerken (Leistungs- und Kostenbilanz, Stromgestehungskosten)".

Als besondere Ereignisse sind zwei Workshops über spezielle MHD-Probleme zu erwähnen, die von der Arbeitsgruppe im IPP im Rahmen der deutsch-amerikanischen Zusammenarbeit auf dem MHD-Gebiet veranstaltet wurden.

Ende des Jahres 1972 musste das BMBW schliesslich trotz positiver Stellungnahmen einiger Energieversorgungsunternehmen, die als potentielle Anwender an MHD-Generatoren interessiert sind, die Förderung des Forschungs- und Entwicklungs-Vorhabens einstellen, da diesem - bei der Begrenztheit der zur Verfügung stehenden Finanzmittel - nicht die zur Fortsetzung erforderliche besondere Priorität zuerkannt wurde.

Da das Jahr 1972 im wesentlichen die Berichtszeiträume des 5. und 6. Halbjahresberichtes der Arbeitsgruppe für das BMBW umfasst, können ausführlichere Informationen über die Arbeiten diesen Berichten entnommen werden.

2.1. Theoretische Untersuchungen

(R. Bünde, J. Raeder)

Im Berichtsjahr wurden die theoretischen Ansätze und Rechenmethoden weiter verbessert, so dass jetzt brauchbare Verfahren für die Auslegung von MHD-Kanälen zur Verfügung stehen.

Es wurde ein neuer Satz eindimensionaler Gleichungen für die Strömung im MHD-Kanal abgeleitet. Dabei wurde insbesondere auf eine klare Definition der verwendeten Mittelwerte Wert gelegt.

Mit einfachen Annahmen über die Entwicklung der Grenzschichten längs des Kanals können nun auch die Werte der Strömungsparameter im Kern der Kanalströmung berechnet werden. Diese Werte sind besonders wichtig für die Bestimmung von Wandreibung und Wärmeverlusten, da in deren Berechnung die Kern- und nicht die Mittelwerte eingehen. Die Beachtung dieser Tatsache führt vor allem bei der Wandreibung dazu, dass wir keinen passenden Zahlenfaktor anbringen müssen, um Übereinstimmung zwischen Theorie und Messung zu erzielen. Ein solcher Zahlenfaktor war von mehreren Autoren angegeben und mit verschiedenen Hypothesen begründet worden, von denen keine bei unseren Messungen verifiziert werden konnte.

Überlegungen zu den chemischen Reaktionszeiten des Verbrennungsgases im MHD-Kanal und zu der Frequenz der turbulenten Fluktuationen in der Grenzschicht führten zu der Feststellung, dass die chemischen Reaktionen in den Randschichten eingefroren sein müssen. Die Berücksichtigung dieser Tatsache führt vor allem in der ersten Hälfte des Kanals zu einer starken Erniedrigung der Wärmeverluste, die auch experimentell beobachtet wurde.

Unter Verwendung unseres Rechenprogramms "SIMKA" für die Kanalströmung wurden Messungen der Verteilung des axialen elektrischen Feldes ausgewertet. Das Ziel dieser Auswertung war die Bestimmung des Spannungsabfalls ("Elektrodenfalles"), der notwendig ist, um den Strom in der Grenzschicht zwischen den Elektroden und dem heißen Kern der Strömung aufrecht zu erhalten. Diese Arbeiten führten zur Aufstellung einer Kennlinie für die Elektrodenfälle. Daneben wurde eine Vielzahl von kleineren Rechnungen durchgeführt, die sich vor allem auf die Bestimmung von Grenzschichtprofilen, den Einfluss von Fluktuationen auf die mittlere Leistung und auf die Berücksichtigung neuer Daten für die elektrische Leitfähigkeit bezogen.

Alle Arbeiten zusammengefasst führten dazu, dass wir nun den Generator von der Verbrennung des Treibstoffs im Brennsystem bis zum Ende des Kanals berechnen können. Die Ergebnisse stimmen gut mit Messungen überein, ohne dass "technische Anpassungsfaktoren" verwendet werden müssen. Es genügt vielmehr, Messwerte für Verbrennungswirkungsgrad und Elektrodenfälle einzusetzen, da diese theoretisch noch gar nicht bzw. nur unvollständig vorhergesagt werden können.

Um komplette MHD-Generator-Systeme für vorgegebene Leistungswerte auslegen zu können, wurden die Programme zur Berechnung der thermodynamischen und elektrischen Daten in Brennkammer, Düse und Generatorkanal zu einem Gesamtprogramm kombiniert. Damit wurde es auch möglich, den Einfluss aller bei der Auslegung frei wählbarer Parameter auf den Gesamtwirkungsgrad der Energieumwandlung und auf die Leistungsdichte im MHD-Kanal zu bestimmen. Ausgehend von den Werten für Wirkungsgrad und Leistungsdichte im MHD-Kanal können nun die Stromkosten berechnet werden. Damit kann der Einfluss der Variation der Auslegungsparameter auf die Stromkosten festgestellt, eine MHD-Generator-Anlage also auch kostenoptimal ausgelegt werden.

Die Arbeiten zum technisch-wirtschaftlichen Einsatz des Generators wurden fortgesetzt. Eine grosse Zahl von potentiellen MHD-Generator-Betreibern - hauptsächlich mittlere und kleinere Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) - halten die Verwendung dieses Generators zur Lieferung von Momentanreserve für wünschenswert und befürworten den Bau des geplanten 10 MW-Generators. Zwei EVU erklärten sich bereit, eine solche Anlage in ihrem Netz und damit unter realen Betriebsbedingungen einzusetzen. Erst auf der Basis der dabei anfallenden Erfahrungen ist eine Entscheidung über die breite Anwendung in der Elektrizitätswirtschaft möglich. Die Stellungnahmen der EVU wurden in einer vertraulich zu behandelnden Dokumentation "Über das Interesse von Energieversorgungsunternehmen und Industriefirmen am Sofortreserve-MHD-Generator" zusammengefasst und dem BMBW zur Verfügung gestellt. Im Gegensatz zum BMBW sind die am Projekt Beteiligten der Auffassung, dass ein ausreichendes Interesse der Energieversorgungsunternehmen für Kurzzeit-Reserveaggregate besteht und dass die Entscheidung des BMBW, die MHD-Entwicklung nicht weiter zu fördern, von der Sache her nicht gerechtfertigt ist.

Auf Wunsch des BMBW bzw. der von ihm eingesetzten Ausschüsse für die MHD-Projekte beteiligte sich die Arbeitsgemeinschaft IPP-MAN auch an der Untersuchung von Problemen der Langzeit-MHD-Generatoren. Die damit befasste Studiengruppe erarbeitete einen Bericht über "Die Wirtschaftlichkeit von Verbrennungsgas-MHD-Kraftwerken (Leistungs- und Kostenbilanz, Stromgestehungskosten)".

2.2. Experimentelle Untersuchungen

(R. Volk, G. Zankl)

Wesentliches Ziel der Experimente im gesamten ersten Projektabschnitt war es, Messergebnisse zu liefern, die eine Prüfung der Modelle erlaubten, welche im Rahmen der theoretischen Arbeiten entwickelt wurden.

Die 1971 aufgetretenen unerwarteten Schwierigkeiten bei der Messung der Plasmatemperatur waren auch zu Beginn des Jahres 1972 noch nicht überwunden. Da Untersuchungen im MHD-Betrieb wichtiger erschienen als die Aufklärung der Messschwierigkeiten, wurden trotz der unsicheren Ausgangssituation MHD-Versuche sowohl mit Kerosen als auch mit Benzol als Brennstoff durchgeführt.

Die Messungen ergaben mit 5 mho/m etwa die gleiche Leitfähigkeit des Kerosen-Sauerstoff-Kaliumoktoat-Verbrennungsplasmas, wie sie bei früheren Messungen ermittelt worden war. Sie zeigten aber vor allem hochfrequente Schwankungen (etwa $\pm 50\%$ vom Mittelwert). Solche Fluktuationen wurden auch bei den Strom-, Spannungs- und Potentialmessungen am Slantwall-Kanal sowohl mit Kerosen als auch mit Benzol als Treibstoff festgestellt. Dabei konnten mit Kerosen zeitlich gemittelte Leistungsdichten von 26 MW/m^3 in der Kanalmitte festgestellt werden, mit Benzol solche von 62 MW/m^3 . Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom erreichten bei Kerosenverbrennung 3050 V bzw. 90 A, bei Benzolverbrennung 3400 V bzw. 209 A. Die magnetische Induktion betrug dabei 5 Tesla.

Bei den Experimenten wurde eine Datenerfassungsanlage eingesetzt. Diese Anlage erlaubt die simultane Aufzeichnung von ca. 100 Messwerten mit einer Zeitauflösung von 0,01 sec oder (im anderen Grenzfall) von einem Messwert mit 10^{-4} sec Zeitauflösung. Ein Beispiel für Ergebnisse, die von der IBM 360/91 des Instituts in Plot-form geliefert werden, ist in Abb. 1 zu sehen.

Im Anschluss an die ersten MHD-Messreihen wurden die Bemühungen auf die Beseitigung der Fluktuationen konzentriert. Eine Analyse aller Messungen liess erkennen, dass die Schwankungen in allen Messwerten mit Parametern des Brennsystems korreliert sind. Da unser Generator mit einer Überschallströmung arbeitet, liegen also die Ursachen für die Störungen im Brenner. Einige Messungen und Abschätzungen liessen eine unvollständige Verbrennung auf Grund zu grosser Tröpfchendurchmesser der zerstäubten Treibstoffkomponenten vermuten. Deshalb wurde in enger Zusammenarbeit mit der MAN eine umfangreiche Untersuchungsreihe durchgeführt, bei der eine Vielzahl von Einspritzsystemvarianten getestet und verglichen wurde. Dabei erwies sich der MHD-Kanal (im Generatorbetrieb wie auch bei angelegter Fremdspannung für Leitfähigkeitsmessungen) als ausgezeichnetes Diagnostikwerkzeug zur Beurteilung der Brenneigenschaften. Elektrische Messungen und optische Untersuchungen des Plasmas bezüglich seiner Transparenz liessen im Verein mit Druckmessungen und Rechnungen zur Entwicklung der Strömung nicht nur die beste Brennsystemvariante (Einspritzdüsenkombination) finden, sondern führten auch zu einem wesentlich besseren Verständnis der Vorgänge im Brennsystem. Die Fluktuationen konnten so um etwa eine Grössenordnung reduziert werden und lagen unter $\pm 5\%$ der mittleren Messwerte.

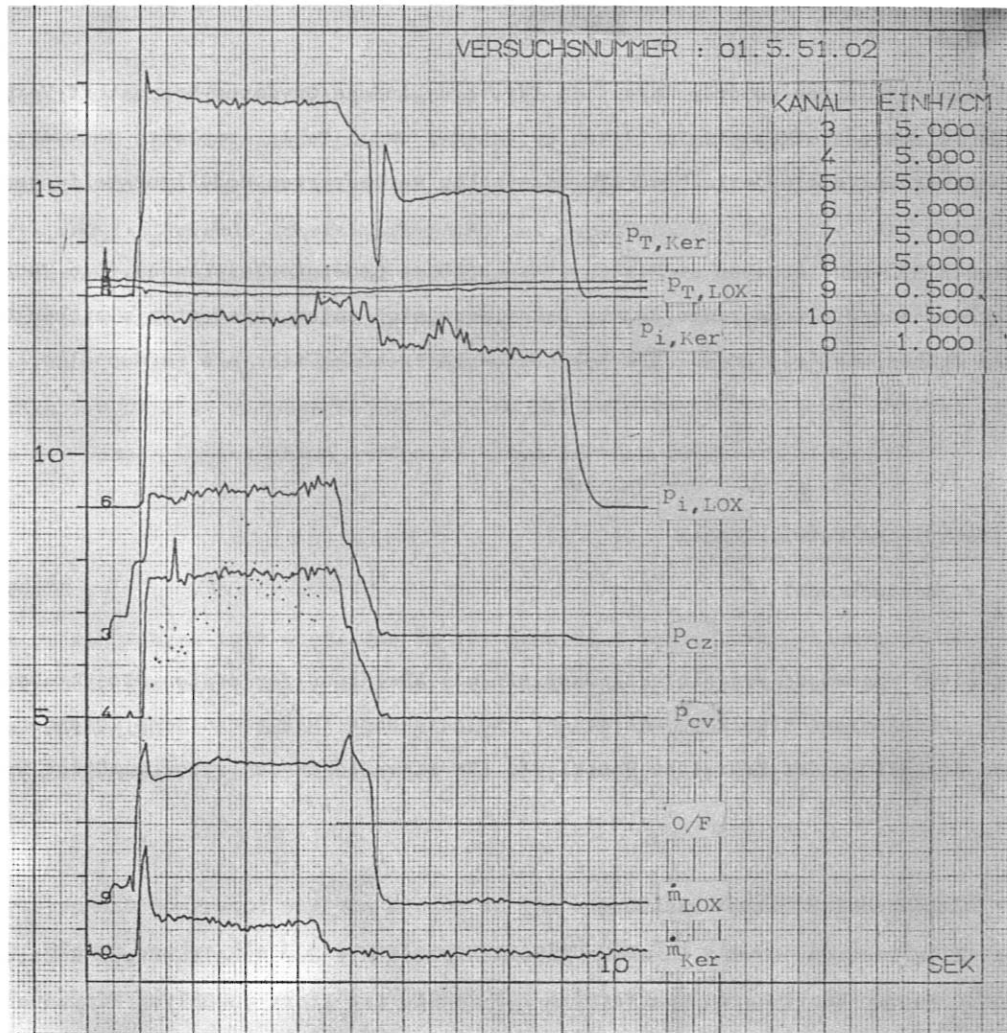


Abb.1

Verschiedene Grössen des Brennsystems im Verlauf eines Brennversuches. Die Messwerte wurden mit der Datenerfassungsanlage registriert und mit Hilfe der Grossrechenanlage gezeichnet. Es bedeuten:

- | | | | |
|-------|----|---|---------------------------------------|
| Kanal | 3 | = | Zündkammerdruck p_{cz} |
| | 4 | = | Brennkammerdruck p_{cv} |
| | 5 | = | Einspritzdruck Kerosen $p_{i,Ker}$ |
| | 6 | = | Einspritzdruck Sauerstoff $p_{i,LOX}$ |
| | 7 | = | Tankdruck Kerosen $p_{T,Ker}$ |
| | 8 | = | Tankdruck Sauerstoff $p_{T,LOX}$ |
| | 9 | = | Durchsatz Sauerstoff \dot{m}_{LOX} |
| | 10 | = | Durchsatz Kerosen \dot{m}_{Ker} |
| | 0 | = | O/F (berechnet) |

Gegen Ende des Jahres konnten daraufhin für verschiedene Oxydator-Brennstoff-Verhältnisse und für verschiedene Magnetfeldstärken zwischen 2 und 5 Tesla komplette Messwertserien aufgenommen werden, die es erlauben, die inzwischen verbesserten Modellvorstellungen zu prüfen.

Bei diesen MHD-runs ergaben sich auch stark erhöhte Generatorleistungen. Die Verbesserung des Verbrennungswirkungsgrades führte dazu, dass sich unter sonst etwa gleichen Bedingungen wie früher die Leistungsdichte bei Kerosenverbrennung mehr als verdoppelte.

2.3. Technische Entwicklungen

(H. Muntenbruch)

Die Arbeiten wurden so organisiert, dass sie mit Abschluss des ersten Projektabschnittes in sich geschlossene Resultate lieferten, und dass Ende 1972 technische Lösungen vorlagen, die zur Erstellung der baureifen Unterlagen für einen 10 MW-Generator benötigt werden.

2.3.1. Entwicklung von Werkstoffen

Vom Battelle-Institut wurden in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Kurzzeit-MHD-Generator Kupfer-Email-Verbundwerkstoffe für Kanäle mit stark gekühlten Wänden entwickelt und getestet. Dabei handelt es sich um Verbundkörper aus dünnen, beidseitig elektrisch nichtleitend emaillierten Kupferplatten, die durch Anschmelzen der Emails unter Druck miteinander "verklebt" sind. In einer zweiten Entwicklungslinie wurden Waben-Keramiken hergestellt und untersucht, deren 1 - 2 mm grosse Waben mit Kupfer- oder anderen Metallen gefüllt waren und die höhere Kanalwandtemperaturen erlauben sollten. Mit beiden Werkstoffen sollten sich MHD-Kanäle besonders feiner Segmentierung herstellen lassen und damit hohe Hallfeldstärken erlaubt sein. Die Arbeiten führten u.a. zu zwei Patentanmeldungen.

2.3.2. Konstruktion von Kanälen

Die Entwicklungsarbeiten an MHD-Kanälen konnten Ende des ersten Projektabschnitts zu einem Zwischenabschluss gebracht werden. So waren Konstruktion und Fertigung des Kanals W1 beendet, eines MHD-Kanals für heisse Wände, die von schlittenähnlichen Bauelementen getragen werden. Leichte Auswechselbarkeit der Wandelemente und grosse Variabilität der Elektrodenverschaltung kennzeichnen den W1.

Für die Erstellung baureifer Unterlagen war es wichtig, dass die betriebstechnischen Erfahrungen mit dem Slant-Wall-Kanal D 45/1 so positiv waren, dass sein Konstruktionsprinzip als brauchbar für die baureifen Unterlagen für einen 10 MW-MHD-Kanal angesehen werden kann. Die gefederte und isolierende Schraubverbindung der Scheiben, die Isolation der Scheiben mit Asbestwerkstoffen gegeneinander und die Längsteilung des Kanals (aus Fertigungsgründen) haben sich bewährt. Der MHD-Kanal D 45/1 war 1972 ca. 350 mal im Einsatz. Dabei traten am eigentlichen Kanal keine wesentlichen Probleme auf. Der Kanal war gegen Überschläge zwischen benachbarten Platten durchschlagfest bis zu Hallfeldstärken von etwa 30 V/cm. Die Erfahrungen mit dieser Konstruktion werden in einem Bericht wiedergegeben.

2.3.3. Magnete

Während des ganzen Jahres 1972 wurde der im IPP gebaute 5 Tesla-Luftspulenmagnet in vielen hundert Betriebszyklen eingesetzt, ohne dass es jemals zu Schwierigkeiten kam. Durch Übergang von der anfänglichen Stromkonstantregelung auf programmgesteuerte Spannungsregelung konnten ausgezeichnete Flattopeigenschaften für alle Induktionen zwischen 1 und 5 Tesla erreicht werden.

Für den Prototyp-MHD-Generator war von Anfang an ein supraleitender Sattelspulmagnet vorgesehen. Für diesen wurden die Konstruktionsprinzipien von der Siemens AG unter enger Mitwirkung der Arbeitsgruppe Kurzzeit-MHD-Generator erarbeitet. Statik des Systems, Elektrik und Magnetik, das Kryogefäß und die Kälteanlage stellten die wesentlichen bearbeiteten Teilgebiete dar. Das erarbeitete Konstruktionskonzept lässt es zu, die Lineardimensionen des Magneten ohne wesentliche Änderungen etwa um den Faktor 2 zu vergrößern bzw. zu verkleinern. Wesentliche Daten des Magneten:

Magnetische Induktion im Zentrum	$B = 5 \text{ Tesla}$
Magnetische Länge	$L = 2 \text{ m}$
Freier Kryostatinnendurchmesser	$d = 0,7 \text{ m}$
Feldhomogenität im Kernbereich	$\Delta B \leq \pm 0,25 \text{ Tesla}$
Maximale Abkühlzeit	$t = 200 \text{ Std.}$
Maximale Erregungszeit	$\tau = 1 \text{ Std.}$
Garantierte ununterbrochene Betriebszeit	$T \geq 5000 \text{ Std.}$

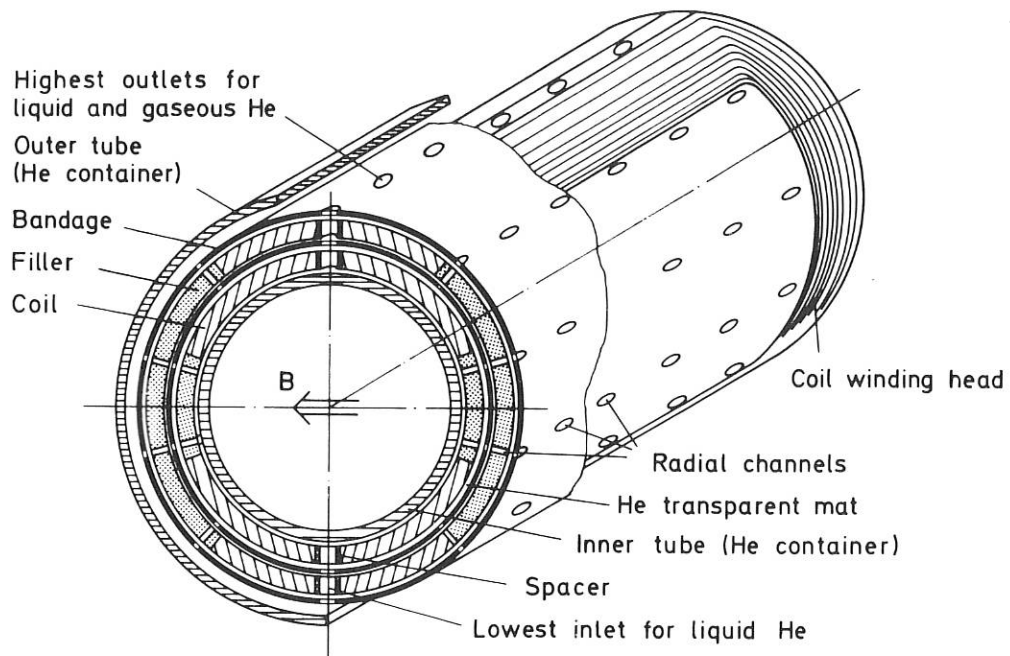


Abb. 2 Prinzipskizze zum Aufbau des supraleitenden Dipolmagneten

2.4. Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen stosswellenerzeugten Plasmaströmungen und Magnetfeldern

(H. Muntenbruch, F. Sardei, W. Zimmermann)

Die Untersuchungen der Reflexion von Stosswellen an Magnetfeldern wurden mit zwei Dissertationen abgeschlossen, die (teilweise erweitert) in Form von zwei Laborberichten (IPP IV/41 und IV/49) vorliegen. Über die theoretischen Aspekte der Arbeit wurde auf dem IX. Internationalen Shock Tube Symposium in Stanford/Calif. berichtet.

3. Erzeugung dichter Plasmen durch Laser

Da die Aussichten für einen gepulsten, lasergetriebenen Fusionsreaktor ohne Magnetfeld günstiger beurteilt werden, wurde die Arbeit der Gruppe ganz auf die Erzeugung dichter Fusionsplasmen mit PulsLasern ausgerichtet. Das Füllen von magnetischen Konfigurationen mit Laserplasmen wird in einer zweiten Gruppe untersucht.

Die Erzeugung dichter Fusionsplasmen lässt sich grob in zwei Problemkreise teilen, nämlich das Problem der dynamischen Kompression des Targets weit über Festkörperdichte hinaus und das Problem der Absorption von Laserlicht hoher Intensität im Plasma. Die dynamische Kompression des Targets durch lasererzeugte Kompressionswellen ist im Augenblick noch eine Angelegenheit der Theorie, da uns leistungsstarke Laser für Kompressionsexperimente erst in den nächsten Jahren zur Verfügung stehen werden. Die komplexen Vorgänge bei der Implosion starker Kompressionswellen erfordern eine numerische Behandlung; mit der Aufstellung und dem Test geeigneter Programme wurde begonnen.

Erste Ergebnisse werden zu Beginn des kommenden Jahres erwartet. Besondere Aufmerksamkeit wurde zunächst der numerischen Behandlung der nichtlinearen Wärmeleitfähigkeit im Plasma gewidmet.

Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen konzentrierten sich zum grössten Teil auf die Lichtabsorption im Plasma. Das Verständnis dieser Prozesse ist entscheidend für die Verwirklichung einer effektiven Energieeinkopplung ins Plasma sowie für die Auswahl von Lasern mit günstiger Wellenlänge. Die Bedeutung dieses Problemkreises wird unterstrichen durch die experimentelle Beobachtung, dass bei der mit unserer Neodymlaseranlage erreichbaren Intensität von $5 \times 10^{14} \text{ W cm}^{-2}$ bereits ca. 30 % des Laserlichts reflektiert und die Reflexion mit wachsender Intensität noch weiter zunimmt. Im Verlauf unserer Untersuchungen haben sich die Anzeichen vermehrt, dass die stossfreie Wechselwirkung der Lichtwelle mit dem Plasma bereits in unserem jetzigen Experiment eine grosse Rolle spielt. Hinweise darauf sind die Produktion schneller Teilchen (Elektronen und Ionen) im Plasma sowie insbesondere die Beobachtung, dass die Reflexion von Laserlicht unter unseren Bedingungen nicht durch klassische Reflexion an der Schicht mit der kritischen Dichte, sondern sehr wahrscheinlich durch stimulierte Rückstreuung im Plasma erfolgt. Derzeit wird versucht, durch weitere gezielte Messungen und Vergleich mit Modellen der Licht-Plasma-Wechselwirkung ein zusammenhängendes Bild der Lichtabsorption in unserem Plasma zu erarbeiten.

3.1. Experimente zur Licht-Plasma-Wechselwirkung

(K. Eidmann, R. Sigel)

Der im IPP entwickelte Nd-Laser wurde zu Beginn des Berichtsjahres durch eine gekaufte Endstufe von 64 mm \varnothing erweitert. Wegen der infolge der höheren Intensitäten erhöht auftretenden Reflexion am Target erwies sich der Aufbau eines weiteren Faradayrotators grosser Öffnung zwischen dem Endverstärker und der vorletzten Verstärkerstufe als notwendig. Mit der jetzigen Anordnung können wir Laserleistungen bis zu 10 GW (50 J in 5 ns) auf ein Target fokussieren. Bei Verwendung einer asphärischen Linse von 7,5 cm Brennweite beträgt die mittlere Intensität im Fokus etwa 5×10^{14} W/cm² bei 20 J Laserenergie. Es wurden Kohlenstoff- und verbesserte feste Wasserstoff- bzw. Deuteriumtargets in Form von 2×2 mm² quadratischen Stäben benutzt.

Untersuchungen der Energieverteilungsfunktionen der Elektronen und der Ionen im Laserplasma sowie der Eigenschaften des am Laserplasma reflektierten Lichtes standen im Vordergrund.

Beobachtung schneller Teilchen in lasererzeugten Plasmen

Die Frage der nichtthermischen Röntgenlichtemission wurde weiter verfolgt. Dabei zeigte es sich, dass nicht nur das Target, sondern auch die Wand der Targetkammer Röntgenstrahlung emittiert, deren Beitrag vergleichbar mit dem Beitrag vom Target ist. Eine Trennung dieser beiden Anteile war mit Hilfe von Bleiabschirmungen möglich und ergab, dass sowohl die Wand wie auch das Target einen Überschuss an Röntgenstrahlung im Bereich höherer Energien emittiert. Daraus schliessen wir, dass im dichten Plasma schnelle Elektronen erzeugt werden, die dort harte Röntgenstrahlung erzeugen, ausserdem aus dem dichten Plasma austreten, auf die Wand prallen und dort ebenfalls harte Röntgenstrahlung erzeugen. In ersten vorläufigen Experimenten konnten vom Plasma wegfliegende "run away" Elektronen mit einem elektrischen Auffänger nachgewiesen werden.

Neben schnellen Elektronen ergaben sorgfältig durchgeführte Flugzeitmessungen oberhalb einer Laserenergie von 10 J Gruppen von schnellen Ionen mit Energien von einigen 10 keV (Deuteriumtarget).

Untersuchung des reflektierten Lichtes (IPP IV/46)

Sehr wichtig für die Klärung der Frage, wie das Laserlicht im Plasma absorbiert wird, ist die Untersuchung des reflektierten bzw. gestreuten Lichtes. Es wurden die begonnenen Untersuchungen des zeitlichen und spektralen Verhaltens des reflektierten Laserlichtes weiter fortgesetzt. Es zeigt sich über einen grossen Bereich von Laserenergien (10 mJ ... 20 J)

eine Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten R von der Laserleistung gemäss $R \sim I^\alpha$. Im Fall eines Deuteriumtargets ist $\alpha \approx 0,3$, die Reflexion beträgt bei 20 J Laserenergie etwa 30 %.

Die Untersuchung der Richtungsverteilung des reflektierten Laserlichtes brachte das interessante Ergebnis, dass jeder auf das Target einfallende Lichtstrahl in sich zurückreflektiert wird. Besonders deutlich wird dieses Verhalten in dem in Abb.3 gezeigten Experiment demonstriert. Durch eine Maske wurden Teile des Laserlichtbündels abgedeckt und die

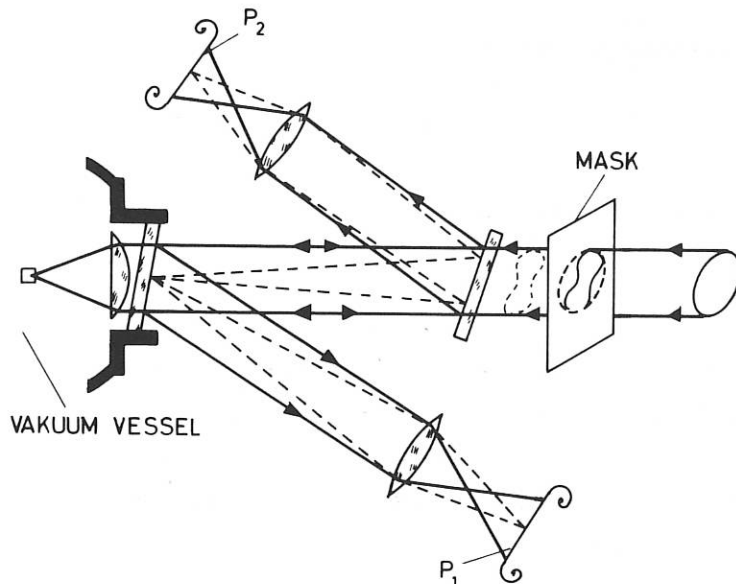


Abb. 3

Anordnung zum Fotografieren der Intensitätsverteilung des einfallenden (P_1) und reflektierten (P_2) Lichtes auf dem Eintrittsfenster der Targetkammer

Lichtverteilung in der Ebene des Austrittsfensters der Targetkammer im einfallenden und im reflektierten Licht beobachtet. Für den Fall einer Maske mit einem ausgeschnittenen Fragezeichen zeigt Abb.4 die Intensitätsverteilung des einfallenden und reflektierten Lichtes, die man beobachtet, wenn man in beiden Fällen von der gleichen Seite auf das Eintrittsfenster schaut. Man sieht, dass sogar der Punkt des Fragezeichens im reflektierten und im einfallenden Licht am gleichen Ort auf dem Eintrittsfenster erscheint.

INCIDENT
MASKED BEAM



REFLECTED

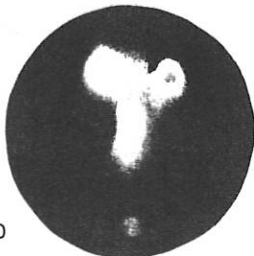


Abb. 4 Ergebnis des in Abb.3 gezeigten Experimentes für den Fall einer Maske in Form eines ausgeschnittenen Fragezeichens

Eine mögliche Deutung dieses anomalen Richtungsverhaltens des reflektierten Lichtes ist die stimulierte Brioullinstreuung im Plasma. In diesem Fall ist eine Rotverschiebung des reflektierten Laserlichtes von einigen \AA zu erwarten. Eine Rotverschiebung in dieser Grösse wurde von uns bereits früher beobachtet (siehe Jahresbericht 1971) und unter der Annahme von klassischer Reflexion an der sich bewegenden Schicht mit der kritischen Dichte als Dopplereffekt gedeutet.

Des weiteren wurde frequenzverdoppeltes Licht bei 5300\AA nachgewiesen. Die Konversion von Laserlicht in harmonisches Licht ist sehr klein (etwa 10^{-5} bei 20 J Laserenergie).

An der Deutung all dieser Beobachtungen wird gearbeitet.

3.2. Apparatur zur Herstellung fester Deuteriumstäbchen

(H. Krause)

Ausgehend von früher gebauten Kryostaten wurde ein neuer Verdampferkryostat entwickelt, mit dem glasklare Stäbchen aus festem Deuterium hergestellt werden können. Diese Targets haben gegenüber den früher verwendeten Deuteriumscheibchen den Vorteil, dass die bei der Bestrahlung der Oberfläche mit Laserlicht im Inneren des Targets auftretenden Vorgänge durch die ebenen Seitenflächen beobachtet werden können.

Der Aufbau des Kryostaten ist aus der Abb.5 ersichtlich. Deuteriumgas wird in den Kühlraum eingelassen und im Wärmeaustausch mit flüssigem Helium verflüssigt und gefroren. Das feste Deuterium wird anschliessend mit Hilfe eines Stempels durch eine Düse von quadratischem Querschnitt gepresst. Es tritt als festes Stäbchen mit $2 \times 2 \text{ mm}$ Querschnitt ins Hochvakuum aus. Die Länge kann bis zu 15 cm betragen (für unsere Zwecke genügen allerdings Stäbchen von 2 cm Länge). Mit einer Deuteriumgasfüllung lassen sich unmittelbar nacheinander über 10 Stäbchen herstellen. Die Abdampftrate beträgt nur $0,1 \text{ mm}/5 \text{ min}$ bei einem Vakuum in der Experimentierkammer von $1 - 2 \times 10^{-5}$ Torr, d.h. es bleibt genügend Zeit, das Target genau in den Brennfleck einzujustieren. Für diesen Zweck ist der Kryostat auf einem Kreuzschlitten befestigt, der ein Einstellen des Targets mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ erlaubt. Dieser Kryostat ist bereits im Einsatz; er hat dazu beigetragen, die Reproduzierbarkeit unserer Messungen beträchtlich zu steigern.

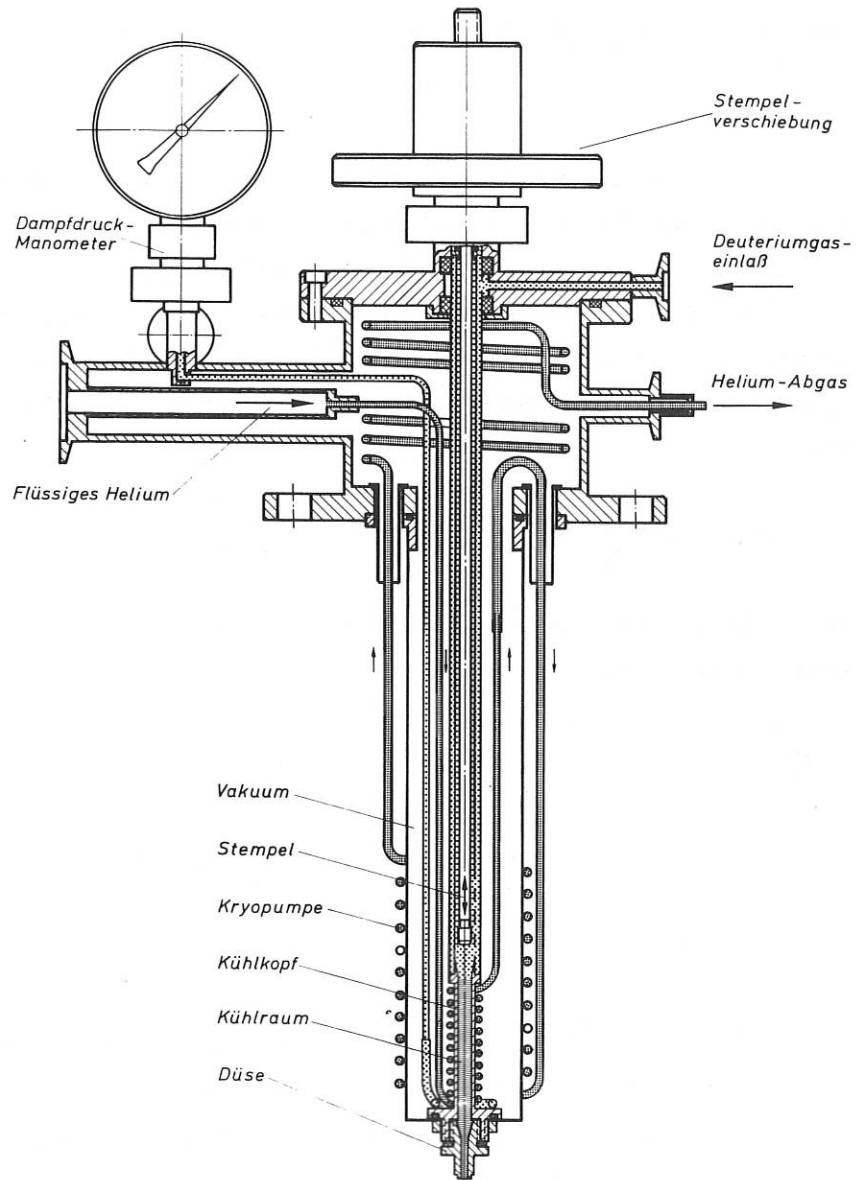


Abb. 5 Verdampferkryostat zur Herstellung von Deuteriumstäbchen

3.3. Parametrische Instabilitäten im Laserplasma

(P. Mulser)

Absorption von Laserlicht kann durch parametrische elektrostatische Instabilitäten modifiziert werden. Das Laserfeld (Frequenz ω_0) induziert im Plasma eine hochfrequente Elektronendrift, wodurch in Gegenwart von elektrostatischen und akustischen Wellen zusätzliche Raumladungen erzeugt werden. Dadurch werden Elektronen- und Ionenwellen miteinander gekoppelt und können instabil werden, sobald die Laserintensität einen kritischen Wert überschreitet. Macht man für die Elektronen- und Ionendichtefluktuationen der Wellenzahl k den Floquet-Ansatz

$$n_e(k, t) = e^{i\omega t} \sum_{-\infty}^{+\infty} a_n e^{in\omega_0 t}, \quad n_i(k, t) = e^{i\omega t} \sum_{-\infty}^{+\infty} b_n e^{in\omega_0 t},$$

dann wird das dynamische Verhalten durch die Determinante $D(\omega, k) = 0$ des folgenden unendlichen Rekursionssystems beschrieben:

$$\{\Omega_n^2 - i\nu_e \Omega_n - \omega_{ek}^2\} a_n - C \{(\omega_0 - 2\Omega_n) a_{n-1} + (\omega_0 + 2\Omega_n) a_{n+1}\} + Z(\omega_{pe}^2 + i\nu_{ei} \Omega_n) \cdot b_n = 0$$

$$\{\Omega_n^2 - i\nu_i \Omega_n - \omega_{ik}^2\} b_n + \{\omega_{pi}^2 + i\frac{m_e}{m_i} \nu_{ei} \Omega_n\} a_n = 0$$

$$(\Omega_n = \omega + n\omega_0, \quad \omega_{ek}^2 = \omega_{pe}^2 + s_e^2 k^2, \quad \omega_{ik}^2 = \omega_{pi}^2 + s_i^2 k^2)$$

Im Resonanzfall ($\omega^2 \simeq (s_i^2 + \frac{m_e}{m_i} s_e^2) k^2$, $\omega_0 \simeq \omega_{ek}$) ergeben sich hieraus mindestens zwei Instabilitäten, von denen die eine konvektiv, die andere absolut ist. Die Schwellintensitäten für ihr Auftreten sind durch die Dämpfungskonstanten ν_e , ν_i gegeben, die sich für kleine Signale n_e , n_i als Summe von Reibungs-, Viskositäts- und Landaudämpfung schreiben lassen:

$$\nu_e = \nu_{ei} + \frac{4}{3} \frac{\nu_e}{m_e n_{e0}} k^2 + \nu_{el}, \quad \nu_i = \frac{m_e}{m_i} \cdot \nu_{ei} + \frac{4}{3} \frac{\nu_i}{m_i n_{i0}} k^2 + \nu_{il}$$

In Plasmen, die durch Nd-Laser erzeugt sind, überwiegt bei den Elektronen Stossdämpfung

ν_{ei} , bei den Ionen viskose (niedriges k) und Ionen-Landaudämpfung (hohes k). Die Schwellintensitäten für die genannten Instabilitäten liegen in diesem Fall zwischen 10^{13} und 10^{14} W/cm².

3.4. Numerische Behandlung der Wärmeleitungsgleichung für vollionisierte, lasererzeugte

Plasmen

(U. Schwenn)

Die Wärmeleitfähigkeit der Elektronen spielt bei der Aufheizung von Targets aus H_2 , D_2 oder D-T eine dominierende Rolle. Nach Spitzer ist der Wärmeleitungskoeffizient

$$K = 20 \left(\frac{2}{\pi}\right)^{3/2} \frac{(kT)^{5/2} K}{m_e^{1/2} e^4 \ln \Lambda} \quad [\text{cgs}] \quad (1)$$

Vernachlässigt man die schwach veränderliche Grösse $\ln \Lambda$, so lautet die Gleichung für den Energietransport durch Wärmeleitung in ebener Geometrie

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial}{\partial x} T^{5/2} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

Die $T^{5/2}$ -Abhängigkeit von K verbietet die Verwendung expliziter Differenzenschemata, da die benötigten Zeitschritte für annähernd stabiles Verhalten um 2 - 3 Grössenordnungen unter den für die Hydrodynamik möglichen liegen und so eine simultane Berechnung unmöglich machen.

Es wurde deshalb ein linearisiertes implizites Differenzenschema entwickelt, dessen Lösungsverfahren die implizite Lösung von mehreren gekoppelten partiellen Differentialgleichungen gestattet. Es wurde an der Gleichung (2) in ebener Geometrie getestet, für die eine stationäre analytische Lösung existiert. Die geschlossene Lösung von (2) lautet für konstante Frontgeschwindigkeit U_F

$$T(x, t) = \left(\frac{5}{2a}\right)^{2/5} (U_F^2 t - U_F \cdot x)^{2/5} \quad (3)$$

Abb.6 zeigt die Temperaturprofile im Abstand von 10 picosec für eine Frontgeschwindigkeit von $U_F = 10^8$ cm/sec. T erreicht Werte über 40 Mill. $^{\circ}K$, entsprechend Schallgeschwindigkeiten von $10^7 - 10^8$ cm/sec. Die analytischen Kurven sind in Abb.6 gestrichelt geplottet. Die numerischen Werte für $T(x)$ und U_F unterscheiden sich um weniger als 1 %, die Energiebilanz ist dementsprechend (EKON in Abb.6 = $|1 - E(\text{theoretisch})/E(\text{numerisch})|$) gut erfüllt. Das Verfahren ist absolut stabil für beliebige $\Delta t/\Delta x$ -Werte $\leq 10^{-8}$; Variation von Δt über 3 Zehnerpotenzen führte zu keinen sichtbaren Rundungsfehlern (jeweils bezogen auf den in Abb. 6 gezeigten Fall).

Das Differenzenschema lässt sich sowohl in Eulerscher als auch in Lagrange-Formulierung in die hydrodynamischen Gleichungen einsetzen und liefert stabile Ergebnisse für alle damit behandelten Probleme.

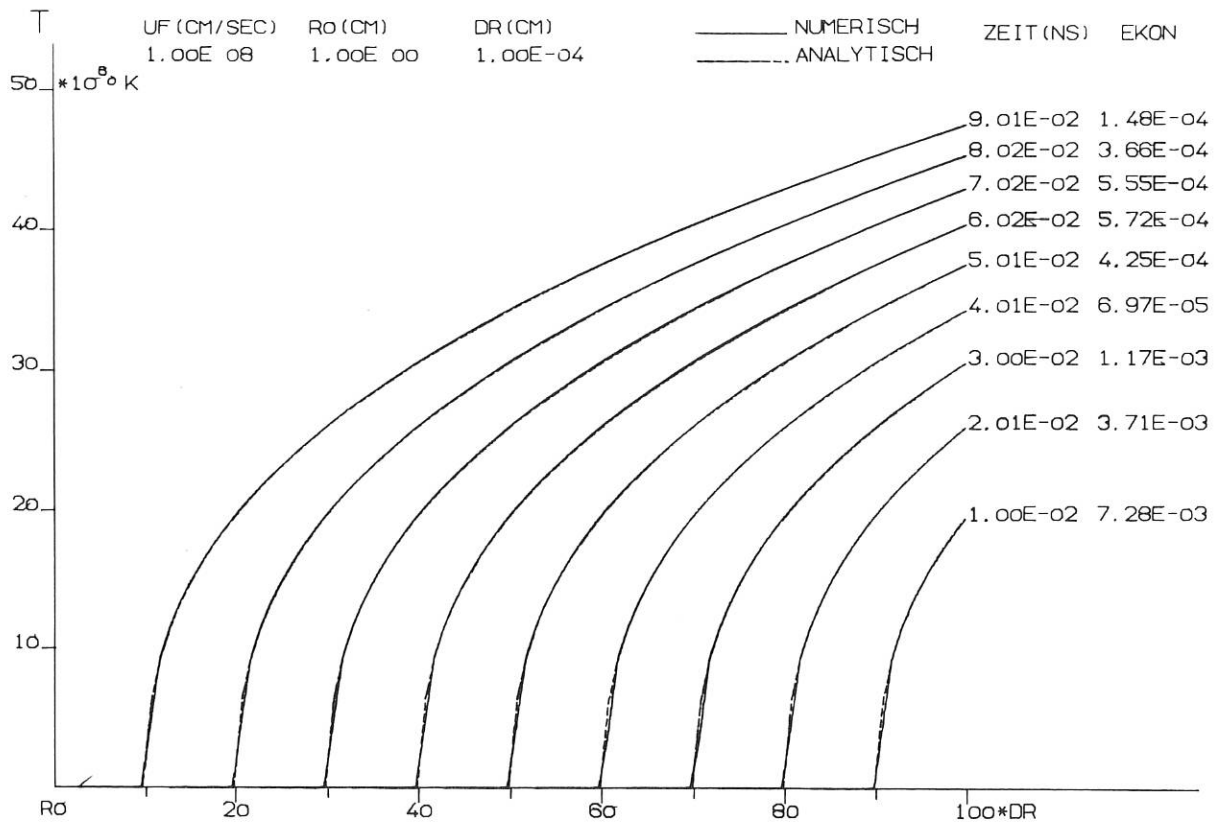


Abb. 6 Analytische und numerische Temperaturprofile für die stationäre Lösung der Wärmeleitungsdifferentialgleichung

3.5. Hydrodynamische Kompressionsrechnungen

(L.L. Lengyel)

In Verbindung mit dem Problem der Pellet-Kompression mittels Laser-Pulsen wurde die bekannte Analogie zwischen eindimensionalen instationären und zweidimensionalen stationären gasdynamischen Vorgängen näher betrachtet. Es ist gelungen zu zeigen, dass mindestens in einem Falle (Gaskompression durch in einem Punkt kollidierende Kompressionswellen, die von einer entsprechend vorgeschriebenen Kolbenbewegung hervorgerufen werden), einerseits, und Kompression einer Überschallströmung an einer konkaven Oberfläche, deren Krümmung der Kolbenbahn entspricht, andererseits, nicht nur qualitative sondern auch exakte quantitative Analogie existiert.

Um die gasdynamischen Vorgänge bei implodierenden Hohlkugeln numerisch verfolgen zu können, wurde die Entwicklung eines eindimensionalen Lagrangeschen Systems angefangen.

3.6. Eindimensionales Lagrange-Schema für Laser-Kompressionsrechnung

(K. Lackner, L.L. Lengyel)

Diese Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit den unter 3.5 beschriebenen durchgeführt und erscheinen im Bericht der Abteilung Theorie.

4. Laserplasmaquelle für Einschlussexperimente

(K. Büchl, H. Hora, M. Salvat, M. Tanimoto)

Lasererzeugte Plasmen sind für die Füllung von Magnetfeldkonfigurationen wie Stellarator oder Tokomak mit einem reinen, heissen Ausgangsplasma von Interesse (Abb. 7). Die Arbeiten

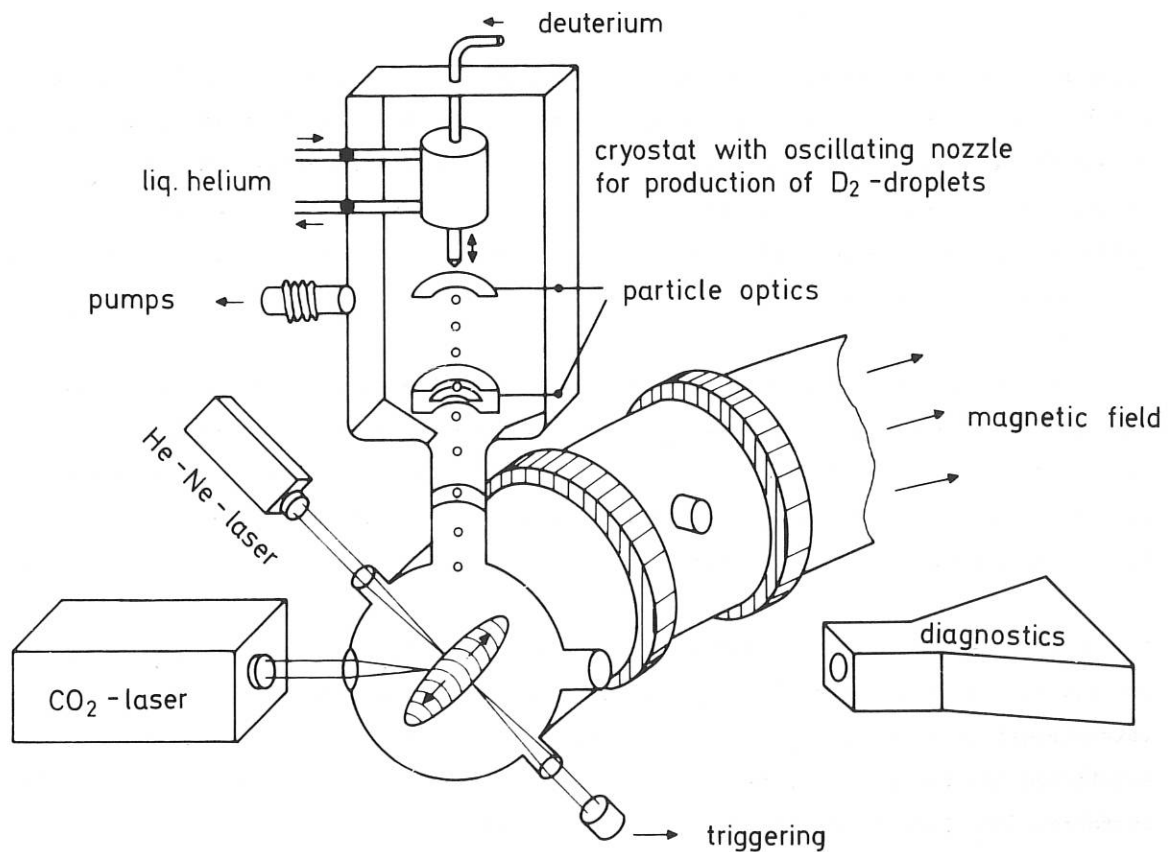


Abb. 7 Prinzipielle Anordnung zur Erzeugung von Plasmen in Magnetfeldern durch Laser

auf diesem Gebiet wurden im Jahre 1972 verstärkt weitergeführt. Sie lassen sich in die folgenden Teilaufgaben gliedern:

1. Erzeugung von Pellets mit einem Teilchendurchmesser von ca. 20 bis 500 μ und einer Erzeugungsfrequenz zwischen ca. 0,01 und 10^3 Hz.
2. Ladung der Pellets, damit sie mit Hilfe von elektrischen Feldern zum Fokus eines Lasers geführt werden können.
3. Produktion des Plasmas mit Hilfe eines Hochleistungs-CO₂-Lasers und Untersuchung des Verhaltens des Plasmas während der Expansion im Magnetfeld.
4. Theoretische Arbeiten mit dem Ziel, die Anfangsphase der Expansion im Magnetfeld und die weitere Expansion im toroidalen Feld zu interpretieren.

Im einzelnen wurden im Jahre 1972 folgende Arbeiten durchgeführt:

1. Aufbauend auf den Erfahrungen der im letzten Jahresbericht beschriebenen Versuche mit Wasser wurde eine Kryo-Apparatur zur Produktion von Pellets aus flüssigem Argon und Sauerstoff aufgebaut. Wie früher wird auch hier das Aufbrechen eines Flüssigkeitsstrahles in eine Kette gleichgrosser Tropfen durch Anregung von Rayleigh-Instabilitäten ausgenutzt. Es wurden Tröpfchen mit Durchmessern von ca. 100 - 300 μ mit einer Folgefrequenz von etwa 10^3 pro Sekunde hergestellt.

Versuche zur Ladung der Teilchen zeigten, dass es möglich war, die Teilchen zu laden. Da die Führung des Pellets bis ins Hochvakuum erfolgen muss ist es notwendig, die Teilchen durch sukzessive Blenden (\varnothing ca. 1 mm) hindurchzuführen. Die Blenden ermöglichen eine genaue Einstellung des Druckes um das Pellet. Erste Tests mit einem differentiellen Pumpsystem sind erfolgreich verlaufen.

2. Aufbau einer experimentellen Anordnung zur Untersuchung der Anfangsphase der Expansion des Plasmas im Magnetfeld: Die Anlage besteht aus einem Magnetfeld bis 50 kG, einem Vakuumkessel sowie einem CO₂-Laser von 40 Joule in 1 μ sec. Als Targets werden Paraffinkugeln von ca. 200 μ Durchmesser benutzt, die an Quarzfäden aufgehängt sind. Diagnostikverfahren (CO₂-Laserstrahlungsmessung, Bildwandlerkamera, CO₂-Laser-Interferometer) sind im Aufbau

3. Abschätzungen (IPP IV/50) haben ergeben, dass man mit CO_2 -Laserpulsen von 50 J bis 500 J Plasmen mit einer Temperatur zwischen 16 eV und 160 eV zur Füllung des Wega Stellarators mit etwa 10^{19} Teilchen erzeugen kann.

5. Chemische Laser

Die Arbeiten auf diesem Gebiet befassten sich im Jahre 1972 mit der Weiterentwicklung des photochemischen Jodlasers sowie in geringerem Umfang mit der Untersuchung des chemischen Fluorwasserstofflasers. Diese zwei Arbeitsrichtungen unterscheiden sich dadurch, dass die Jodlaserentwicklung kurzfristig auf experimentelle Anwendungen ausgerichtet ist, während die HF-Experimente erst langfristig zu einer Hochleistungslaserentwicklung führen können und jetzt noch mehr den Charakter von Grundlagenforschung haben. Diese Untersuchungen sollen nicht auf HF beschränkt bleiben, sondern haben generell die Verfolgung neuer Konzepte für chemische Laser und andere mögliche Hochleistungslaser zum Gegenstand. Demgegenüber ist die Entwicklung eines 1 kJ-Jodlasersystems auf den Einsatz in Fusionsexperimenten in den Jahren 1974/75 ausgerichtet. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass der Jodlaser als ein optisch gepumpter Gaslaser einige wichtige Vorteile gegenüber Festkörperlasern haben sollte. Diese liegen in der sehr hohen und darüber hinaus auch noch einstellbaren Verstärkung des Lasermaterials, in den günstigeren optischen und Material-Parametern und in der einfacheren Handhabung. Als ein Nachteil, den dieser Laser mit den Hochleistungs-Festkörperlasern teilt, muss die relativ geringe Ausbeute gelten. Der Umwandlungsgrad der elektrischen, in die Blitzlichtlampen eingespeisten Energie in Laserenergie ist derzeit nur 0,5 %. Allerdings besteht die begründete Hoffnung, dass diese Ausbeute noch etwas gesteigert werden kann.

5.1. Jodlaser

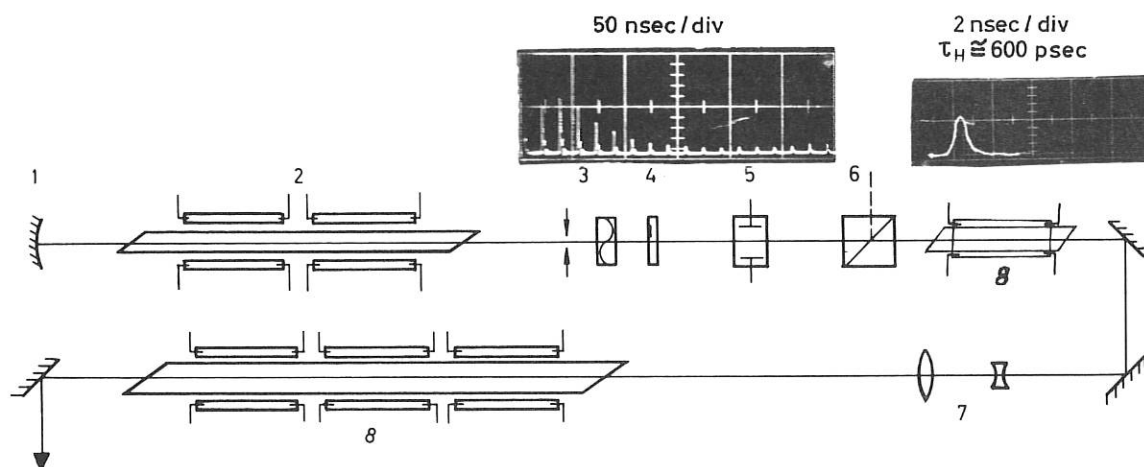
(K. Hohla, G. Brederlow, G. Fuss, G. Klement⁺), K.L. Kompa, H. Spiegel, H. Wedler⁺,
K.J. Witte)

5.1.1. Gigawatt-Jodlaser Asterix I

In den ersten Monaten des Jahres 1972 wurde eine Oszillator-Verstärkeranordnung gebaut, die zum ersten Mal Pulse von mehr als 1 Gigawatt lieferte bei Pulsdauern um 10 nsec (Experiment "Asterix I"). Die weitere Entwicklung ist so vorgesehen, dass zunächst ein Laser-

⁺) Abteilung Technik

system mit ca. 100 Joule Pulsenergie aufgebaut wird ("Asterix II"), das dann im Jahr 1973 bis auf 1000 Joule und eine Laserpulsdauer von etwa 1 nsec weiter entwickelt werden soll ("Asterix III"). Abb.8 zeigt den Entwicklungsstand des 100 Joule-Systems. Pulse von 600 psec Dauer liessen sich mit akusto-optischer Modenkopplung erzielen. Das Signal-Rausch-Verhältnis nach dem Pulsschneidesystem ist $1 : > 10^4$. Ohne Verwendung des kleinen, in Abb.8 eingezeichneten Vorverstärkers wurden die Oszillatorpulse von 1 mJ um einen Faktor $> 10^3$ verstärkt. Die Leistung am Ausgang der ersten Verstärkerstufe beträgt bisher einige Gigawatt.



Zum Endverstärker

$< 1 \text{ nsec}, > 100 \text{ J}$

1 100% Spiegel, 2 Oszillator, 8mm ϕ , 3 Modenblende, Modenkoppler, 4 Koppelspiegel, 5 Pockels Zelle, 6 Glan Prismenpolarisator, 7 Strahlenerweiterung, 8 Verstärker, 8 und 25 mm ϕ .

Abb. 8 100-Joule Jodlaser "Asterix II"

5.1.2. Untersuchung der optischen Homogenität des Lasermediums

Eine für eine ausreichende Strahlqualität entscheidende Voraussetzung ist die optische Homogenität des aktiven Materials. Zwei Faktoren spielen in diesem Zusammenhang eine Rolle. Zum ersten ist die Konzentration der angeregten Jodatome über den Rohrquerschnitt nicht konstant, sondern nimmt mit zunehmender Entfernung von den Blitzlichtlampen ab. Dieser Effekt ist um so ausgeprägter, je grösser der Rohrquerschnitt und je höher der Druck ist. Zweitens besteht die Gefahr, dass Stosswellen auftreten, die wegen der damit verbundenen Brechzahländerungen optische Störungen verursachen können.

Eine Möglichkeit, die angeschnittenen Fragen zu klären, bietet die Verwendung der Interferenztechnik. Zu diesem Zweck wurde ein mit C_3F_7J oder einer Mischung aus Argon und C_3F_7J betriebener Jodlaserverstärker in den Strahlengang eines Mach-Zehnder-Interferometers eingebaut. Als Lichtquelle diente ein Argon-Ion-Laser mit einer Pulsdauer von 5 μ s. Mit einer Bildwandlerkamera wurde das Interferenzstreifenmuster fotografiert, dessen zeitliche Veränderung verfolgt wurde. Es zeigte sich, dass optische Störungen vor allem durch das von der Küvettenwand abdampfende Material - vermutlich molekulares Jod - verursacht werden. Die dadurch hervorgerufenen Stosswellen würden erst nach Zeiten von mehr als 20 μ sec nach Blitzbeginn die Funktionsfähigkeit des Verstärkers beeinträchtigen, spielen also bei den in Aussicht genommenen Betriebsbedingungen des 1 kJ-Jodlasers keine Rolle.

5.1.3. Anschwingverhalten eines Jodlasers bei hohen Pumpraten

Die photolytische Anregung des Jodlasers bietet die Möglichkeit, sehr hohe Pumpraten ($> 10^{23} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$) zu erzielen. Diese Pumpraten führen dazu, dass im ersten sich entwickelnden Laserpuls beträchtliche Leistungen erreicht werden können. Diese Tatsache erlaubt es auch, Verstärker für kurze Zeitbereiche über die Selbsterregungsschwelle zu pumpen und somit sehr hohe Verstärkungswerte ohne optische Isolationselemente zu erhalten. In einem Oszillator-Verstärker-Experiment wurde dieses Verhalten untersucht. Es zeigte sich, dass das Anschwingen zusätzlich durch die Zeemanaufspaltung der Laserniveaus im Magnetfeld der Blitzlampen beeinflusst wird. Beim Verschwinden des Magnetfeldes entsteht so ein zusätzlicher "gainswitch"-Effekt. Abb.9 zeigt die zeitliche Korrelation des Stromverlaufs in den Blitzlampen mit dem Anschwingverhalten bei verschiedenen Resonatorparametern sowie die daraus berechnete zeitliche Veränderung des Wirkungsquerschnittes für stimulierte Emission.

5.1.4. 1 kJ-Jodlaser Asterix III

Die Arbeiten an Asterix III betrafen im Berichtsjahr im wesentlichen Auslegung und Konstruktion der Kondensatoranlage sowie Vorversuche mit kleineren Teileinheiten, die die notwendigen Informationen über die Dimensionierung der Gesamtanlage lieferten. Die bisherigen Versuche zeigten, dass eine Ausnutzung von 80 % der gespeicherten Energie in den Blitzlampen gewährleistet ist. An zwei Kondensatoreinheiten mit jeweils 8 kJ und 8 Lampen je Einheit wurden Vorversuche durchgeführt, deren Ergebnisse in nachstehender Tabelle wiedergegeben sind (für Testversuche mit den Blitzlampen vgl. auch den Bericht der Abt. Technik). Die Anlage wird so ausgelegt werden, dass die Betriebsspannung bis auf 60 kV erhöht werden kann, was einer gespeicherten Energie von maximal $\sim 1 \text{ MJ}$ entspricht.

Vorversuche zum 1 kJ-Jodlaser "Asterix III"

Entladeparameter			Induktivitäten	Widerstände
Spannung	40 kV	Baustein	135 nH (34 %)	15 m Ohm (< 14 %)
gespeicherte Energie/Einh.	8,6 kJ	Kabel	160 nH (41 %)	6 m Ohm (< 6 %)
Scheitelstrom	134 kA	Lampen	100 nH (25 %)	87... 118 m Ohm (> 80 %)
Halbwertsbr.d.Strompulses	4,8 μ sec	Gesamt	395 nH	108... 139 m Ohm
in d.Lampen umgesetzte Energie	6,8 kJ			

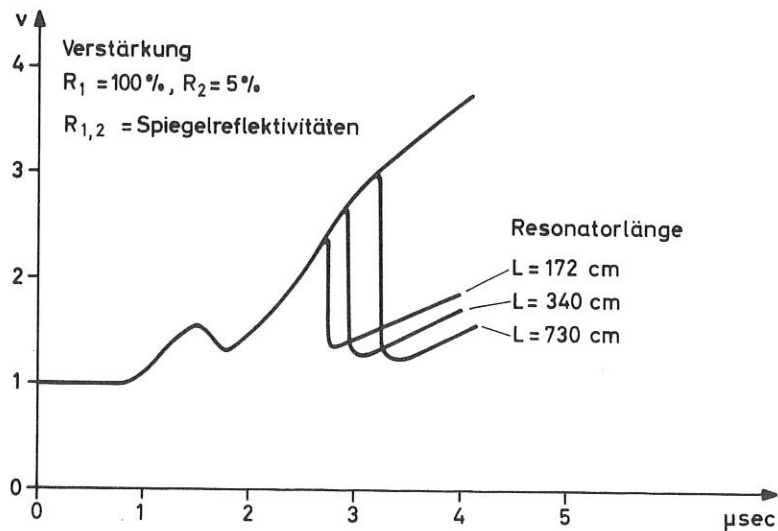
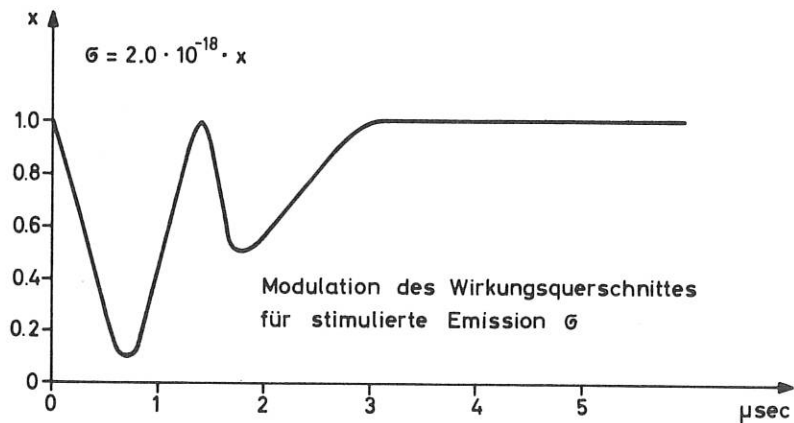
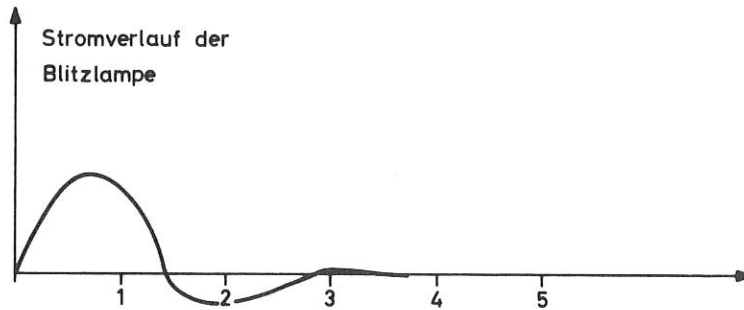


Abb. 9 Anschwingverhalten eines Jodlaserverstärkers bei schnellem Pumpen

5.2. Fluorwasserstofflaser

(R.W.F. Gross, G. Klement⁺⁺, K.L. Kompa, H. Pummer, J. Wanner⁺, H. Wedler⁺⁺, F. Wesner⁺⁺)

5.2.1. Spektroskopische Untersuchungen an einem Fluorwasserstoff-Laser

Ein Fluorwasserstoff-Puls laser wurde entwickelt, dessen maximale Energie 11 J bei einer mittleren Pulsdauer von 100 nsec beträgt. Die Pumpreaktion wird durch eine Hochspannungspulsentladung (120 kV) mit einfacher transversaler Entladungsgeometrie in einer SF_6/H_2 -Mischung initiiert. Die Laserenergie entspricht $\sim 4\%$ der elektrischen Energie des Hochspannungsgenerators. Die Messung von Strom- und Spannungsverlauf an der Laserkammer als Funktion der Zeit und ein Vergleich mit dem zeitlichen Emissionsverhalten zeigen jedoch, dass die Pumpausbeute im Hinblick auf die tatsächliche Energieeinkopplung in die Gasentladung beträchtlich höher ist (vgl. Bericht der Abt. Technik). Abb. 10 zeigt die Ergebnisse der Input/Output-Messungen.

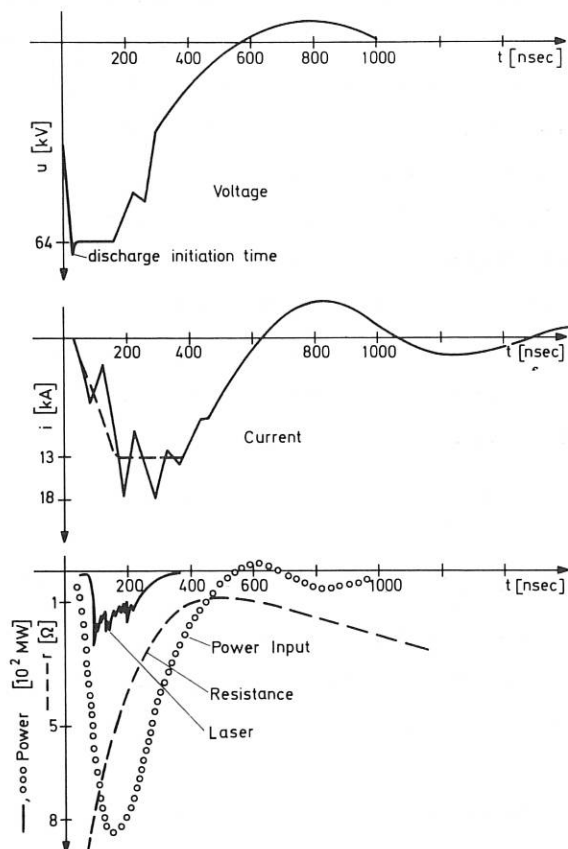


Abb. 10 Vergleich des Strom- und Spannungsverlaufs mit dem Laserpuls des 11-Joule-Fluorwasserstofflasers

⁺) Anorg.-Chem. Institut der Universität München

⁺⁺) Abt. Technik

Das Emissionsspektrum zeigt eine starke Druckabhängigkeit. Bei Druckerniedrigung ($P_{\text{gesamt}} \leq 1 \text{ Torr}$) wird das Signal länger und es treten zunehmend Schwingungs-Rotationslinien mit höherer Rotationsquantenzahl ($J > 10$) auf. Dieses Emissionsverhalten entspricht einer nichtthermischen Rotations-Energieverteilung. Im Gegensatz zu anderslautenden Literaturergebnissen muss angenommen werden, dass die "Pumpreaktion" unter diesen Bedingungen hohe Rotationszustände besetzt. Vorläufige Rechnungen, die ein einfaches von Polanyi und Woodall vorgeschlagenes Rotations-Relaxationsmodell benutzen, stützen diese Interpretation.

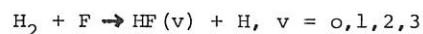
5.2.2. Elektronenkanone zum Pumpen von HF-Lasern

Im Gegensatz zum Pumpen mit Blitzlampen, das beim Jodlaser angewandt wird, setzt man bei Fluorwasserstofflasern meist direkte elektrische Entladungen im Reaktionsgemisch ein. Die Aufgabe der Entladung ist es dabei, freies Fluor zu erzeugen und damit die Reaktion einzuleiten. Die Attraktivität von chemischen Lasern, wie sie in dieser oder verwandten Reaktionen erzeugt werden können, liegt vor allem in ihrem möglicherweise hohen Wirkungsgrad. Dazu ist allerdings Voraussetzung, dass eine hohe Startkonzentration an angeregten Teilchen (Fluor-Atomen) in kurzer Zeit geschaffen werden kann. Unter diesem Gesichtspunkt wurde die Entwicklung einer Elektronenkanone mit Feldemissionskathode, die aus einem Blümlinentladungssystem gespeist wurde, in Angriff genommen. Einzelheiten dieser Entwicklung finden sich in dem entsprechenden Bericht der Abt. Technik. Die Anordnung arbeitet zur Zeit noch mit geringer Ausbeute, doch erscheinen Verbesserungen möglich. Die Laserenergie beträgt bisher $0,2 \text{ J}$ in 30 nsec -Pulsen. Übereinstimmend mit Berichten anderer Laboratorien werden pro 100 keV -Elektron $\sim 2 \times 10^4$ Fluoratome und mithin auch Fluorwasserstoffmoleküle erzeugt. Es besteht die Hoffnung, mit einer solchen Anordnung einen homogenen und schnell gepumpten HF-Laserverstärker für Verstärkungsmessungen zu erhalten.

5.2.3. Dauerstrich-Fluorwasserstoff-Laser für die Untersuchung chemischer Elementarreaktionen

Ein kontinuierlich arbeitender Laser bietet die Möglichkeit, durch Absorptions- und Verstärkungsspektroskopie Aussagen über das zeitliche Verhalten der Energieverteilung zu gewinnen, sofern die Produkte geeignete Absorptionen aufweisen.

Die Eigenschaften eines solchen Lasers, der die Reaktion



ausnutzt, wurden in Abhängigkeit seiner geometrischen, optischen und gasdynamischen Parameter untersucht. In seinem Aufbau entspricht dieser Laser der von Hinchen und Banas/~~1/50~~ sowie von Stephens und Cool/~~39~~/beschriebenen Anordnung: In einer elektrischen Entladung werden SF_6 -Moleküle dissoziiert. Die entstehenden F-Atome reagieren mit H_2 -Molekülen, die durch einen Düsenkamm unmittelbar vor dem quer zur Strömungsrichtung etablierten Resonator injiziert werden.

Maximal wurden Leistungen von 600 mW erzielt, die auftretenden Linien entsprechen (2-1)-Übergängen. Die Laserenergie entspricht etwa 0,1 % der für die Dissoziation der SF_6 -Moleküle aufgewendeten elektrischen Energie und ist dieser direkt proportional.

Es zeigt sich, dass die Strömungsverhältnisse im Bereich des optischen Resonators die Laserleistung sehr stark beeinflussen. Aus den Abmessungen des Strömungskanals, dem Druck in der Laserkammer und dem Saugvermögen der Vakuumpumpe lässt sich eine Lebensdauer der angeregten HF-Moleküle von etwa 0,07 sec atm abschätzen.

Mit diesem Laser sollen schon früher begonnene Versuche fortgesetzt werden, durch Absorptions- und Verstärkungsmessungen Aufschlüsse über Pumpmechanismen und Relaxation in chemischen Lasern zu gewinnen.

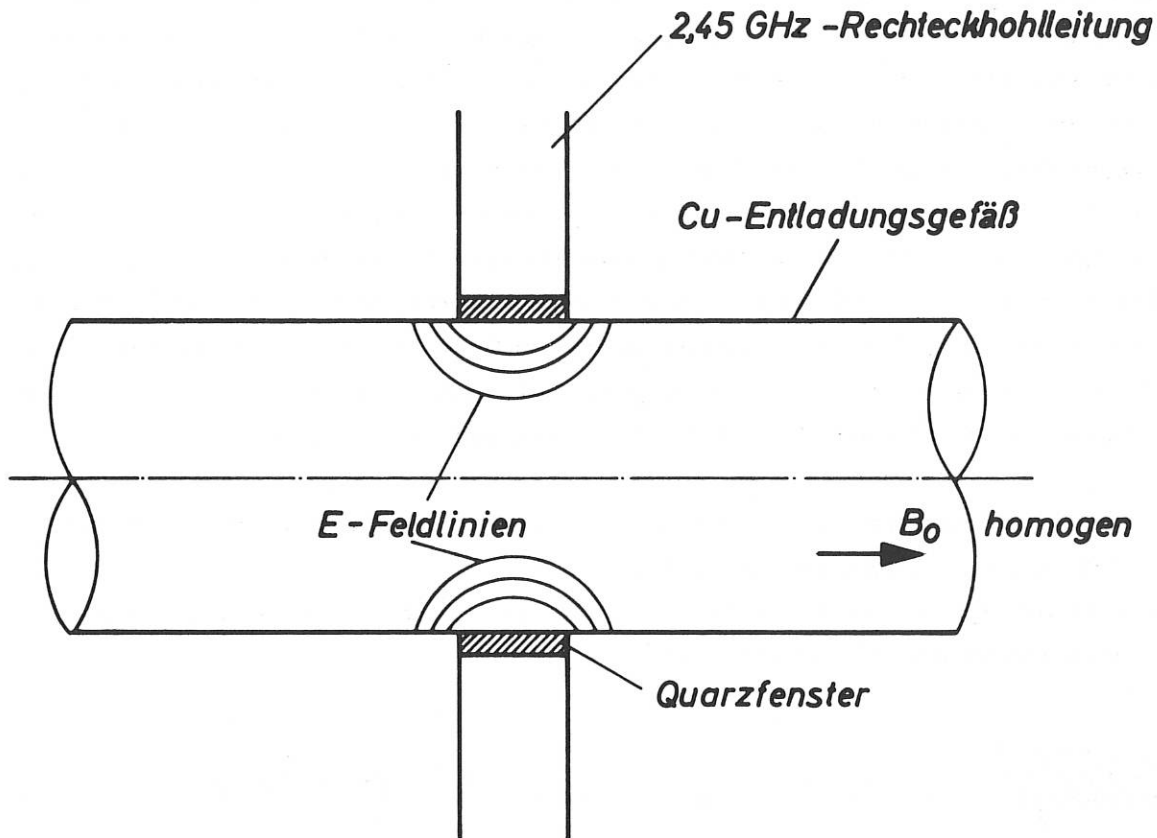


Abb. 11 Mikrowellen-Ankopplung

6.1.2. Plasmaheizung bei der unteren Hybridenfrequenz

(S. Puri, M. Tutter)

Die Rechnungen mit dem Modell eines ebenen, geschichteten, kalten Plasmas mit Stossverlusten als Innenleiter einer Dreiplatten/leitung ("ebene Koaxialleitung") wurden weitergeführt (IPP IV/37, IV/45, IV/51), /199/, ¹⁾, ²⁾. Für einen bestimmten Parametersatz (Abmessungen, Füllgas, Dichte, Dichteverteilung, Magnetfeld, Stossfrequenz und Wellenfrequenz) wurden mehrere fortschreitende Wellenmoden als Eigenwerte des Randwertproblems gefunden.

¹⁾ S. Puri, M. Tutter: "Accessibility to the LHR", wird veröffentlicht in Z.f. Naturforsch.

²⁾ S. Puri, M. Tutter: "LHR-Heating in a parallel-plate waveguide", wird veröffentlicht in Nuclear Fusion

Für jede dieser Moden wurden Absorptionslänge, mittlere Dichte der absorbierten Leistung und Wirkungsgrad berechnet, wobei letzterer als Quotient von im Plasma absorbierter Leistung zu insgesamt, also im Plasma und in der Wand der Aussenleiter, absorbierter Leistung definiert ist. Dieser Wirkungsgrad lag bei allen Moden über 99 %. Die Energieabgabe des Hochfrequenzfeldes an das Plasma erfolgt stets im wesentlichen in der Umgebung der unteren Hybridenresonanzschicht. Diese Schicht wird also von der HF-Energie "erreicht", obwohl die Wellenlänge jeder der betrachteten Moden grösser als die Vakuumwellenlänge war, während die WKB-Lösung für die Erreichbarkeit der LHR-Schicht eine Modenwellenlänge kleiner als Vakuumwellenlänge verlangt, wobei Verzögerungsstrukturen am Aussenleiter nötig wären. Bei anderen Parametern wurden übrigens Moden gefunden, deren Wellenlängen kleiner als die Vakuumwellenlänge waren, wo das "Plasmakabel" also selbst als Verzögerungsleitung wirkt.

Ein wichtiges Rechenergebnis war, dass auch dann noch mindestens eine lecherwellenartige Mode (TEM) möglich ist, wenn die Vakuumwellenlänge beträchtlich grösser als die Querdimension der Leitung ist, sodass für das geplante Heizexperiment die in der Abb.12 zusammengestellten Daten ins Auge gefasst werden konnten.

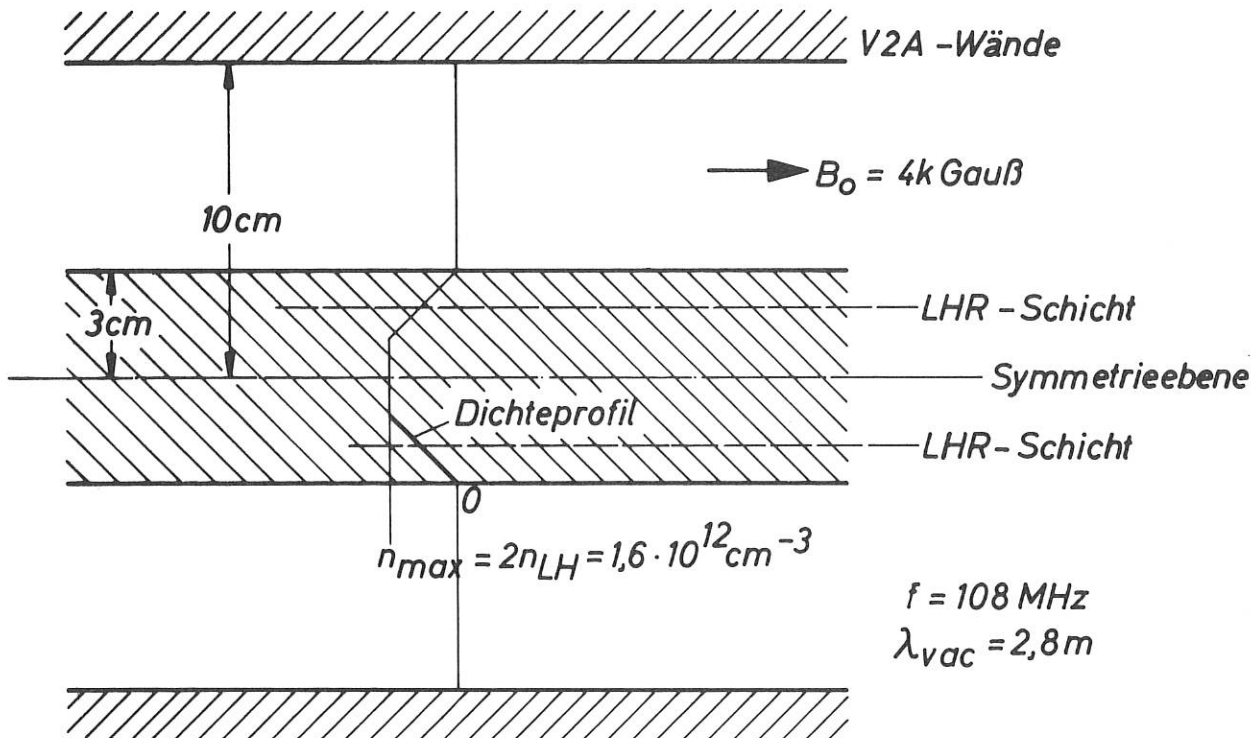


Abb. 12 Ebene Modellordnung zur LHR-Heizung, die den Rechnungen zugrundegelegt wurde. Die Parameter wurden so gewählt, dass die Stelle der unteren Hybridresonanz in der Flanke der Dichteverteilung liegt.

Zur Vorbereitung der Erweiterung der Rechnung auf heisses Plasma wurden unter Zugrundelegung des Derfler-Omura-Tensors ¹⁾ Dispersionskurven im Ionen-Bernsteinwellenbereich gerechnet ²⁾. Abb.13 zeigt als Beispiel den Vergleich der exakten Lösung mit zwei Näherungslösungen. Bei der exakten Dispersionskurve wird die Ausprägung der Resonanz bei der unteren hybriden Frequenz mit wachsender Elektronentemperatur immer schwächer.

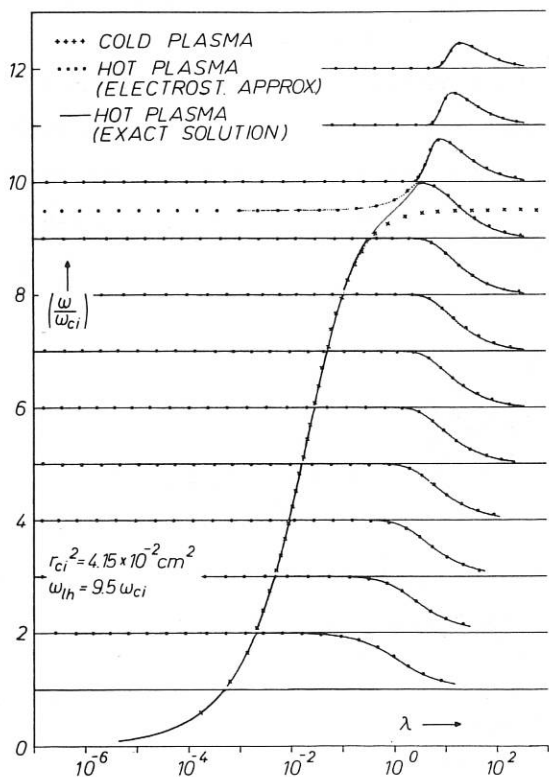


Abb. 13 Ionen-Bernsteinwellen-Dispersionsdiagramm. Auf der Abszisse ist $\lambda = k_{\perp}^2 v_{th}^2 / \omega_c^2 = k_{\perp}^2 r_{ci}^2$ aufgetragen (k_{\perp} = Wellenzahl bei Ausbreitung senkrecht zum Magnetfeld, v_{th} = thermische Geschwindigkeit der Ionen, r_{ci} = Ionengyrationsradius)

1) M. Omura: "Electrostatic Waves in Bounded Hot Plasmas", SU-IPR Report No.156, Stanford Electronics Laboratories (1967)

2) S. Puri, M. Tutter: "Dispersion curves for the generalized Bernstein modes", wird veröffentlicht in J. of Plasma Physics

6.1.3. Stochastische Heizung

(S. Puri)

Mit der schon im letzten Jahresbericht beschriebenen experimentellen Anordnung wurde mit 100 W Leistung einer 8 - 12 GHz-Mikrowellenrauschquelle ein Wasserstoffplasma der Dichte 10^{11} cm^{-3} bei einer Elektronentemperatur von mehr als 500 eV erreicht. Vorläufige Ergebnisse zeigen eine Erhöhung der Ionentemperatur auf ca. 50 eV, wenn zusätzlich ein 4,4 - 6,6 MHz-Rauschsender mit 400 W Ausgangsleistung induktiv angekoppelt wird (siehe Schleife in Abb.14). Ein elektrostatischer Elektronengeschwindigkeitsanalysator wurde entwickelt und damit Elektronengeschwindigkeitsverteilungen gemessen. Die daraus erhaltene Temperatur stimmt mit der aus den Messungen mit der diamagnetischen Spule erhaltenen Temperatur bis auf ca. 25 % im Mittel überein.

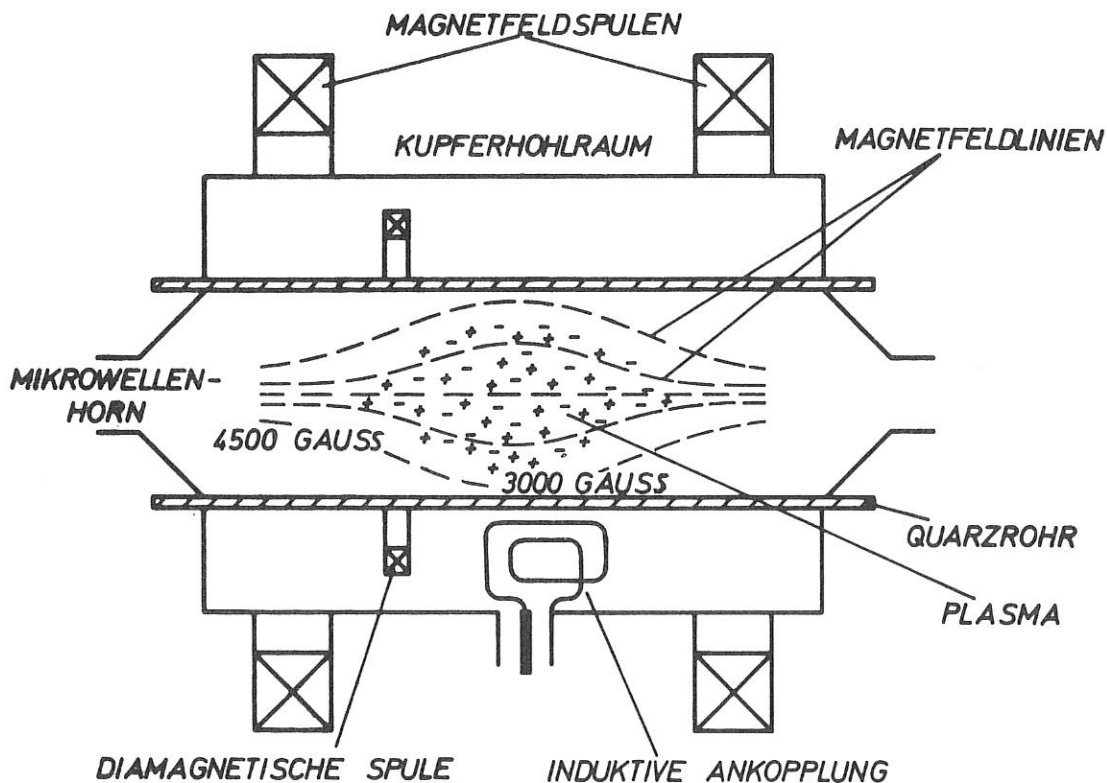


Abb. 14 Spiegelmaschine mit stochastischer Heizung von Elektronen und Ionen

Die bisherigen theoretischen Ergebnisse verschiedener Autoren wurden durch einfache Rechnungen nur mittels der sog. Random-Walk-Theorie neu hergeleitet. Mehrere Fehler sowohl physikalischer als auch algebraischer Natur, welche diesen Autoren unterlaufen waren,

wurden festgestellt und korrigiert. Diese theoretischen und ebenfalls eigene experimentelle Ergebnisse wurden in einem Plenar-Vortrag bei dem Symposium über "Plasmaheating and Injection" in Varenna im September 1972 dargelegt.

6.2. Laserdiagnostik von Plasmawellen und Turbulenzen

Ziel dieser Arbeiten ist die Untersuchung von Elektronendichtefluktuationen und deren Korrelation durch Plasmawellen in Plasmen vom Stellarator- und Tokamak-Typ ($N_e = 10^{11} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = \text{einige eV bis einige keV}$).

Durch kollektive Streuung mit dem langwelligen HCN-Laser, welcher für diese Plasmen die geeignetste Streuquelle darstellt, soll das Verhalten magnetisch eingeschlossener Plasmen während und nach der Heizung durch Hochfrequenz studiert werden, um effektive Heizmechanismen zu finden und auftretende Instabilitäten zu verstehen. Aus Mikrowellenstreuemessungen an dünnen Plasmen ist bekannt, dass dabei stark überthermische Dichtefluktuationen auftreten können, an denen kohärente Streuung des eingestrahlt Lichts auftritt. Dabei erhält man in bestimmte Raumrichtungen eine Überhöhung des Streulichts, welche viele Größenordnungen gegenüber dem Fall eines thermischen Plasmas betragen kann. Eine theoretische Untersuchung dieses Falles wurde von uns durchgeführt.

Aus den Dopplerverschiebungen im Streuspektrum lässt sich das k -Spektrum im Plasma angeregter Wellen bestimmen, die relativen Höhen der auftretenden Peaks liefern die zugehörigen Fluktuationsamplituden, aus der Form der Peaks lässt sich auf die Art der Dämpfungsmechanismen im Plasma schliessen. Für die Messungen wurde von uns ein HCN-Laser als Streuquelle und ein empfindliches heterodynes Empfangsverfahren entwickelt.

Zur Messung der Ionentemperaturverteilung in Plasmen des oben angegebenen Bereichs wurde die Möglichkeit der Verwendung eines TEA-CO₂-Lasers als Streuquelle weiter untersucht. Dabei ergeben sich bei kollektiver Streuung sehr kleine Streuwinkel, die für die Detektion des Streulichts ein spezielles Verfahren durch homodyne Mischung des durchgehenden und des gestreuten Lichts notwendig machen (Jahresbericht 1971). Die dabei benötigten Leistungen liegen im Bereich einiger Megawatt und sind mit käuflichen Lasern bereits erreichbar. Eigene Experimente zur Konzentration der gesamten Laserleistung in eine Laserlinie im transversalen und longitudinalen Monomodebetrieb mit geringen Verlusten wurden mit einem kleinen TEA-Laser erfolgreich durchgeführt. Theoretische Untersuchungen zeigten, dass die im Experiment auftretenden Verteilungen von Phase und Intensität in der Detektorebene homodyne Mischung ermöglichen.

6.2.1. Theorie der kohärenten Streuung elektromagnetischer Wellen an räumlich begrenzten Plasmawellenmodellen

(O. Gehre, H.M. Mayer, M. Tutter)

Der Zweck dieser Arbeit ist es, den Einfluss der räumlichen Begrenzung der Plasmawellen in ihrer Ausbreitungsrichtung auf das Streuspektrum der elektromagnetischen Welle zu zeigen.

Wir betrachteten drei verschiedene Modelle von ebenen Plasmawellen:

- a) eine Welle, die auf ihrem Ausbreitungsweg in ihrer Amplitude zunächst anwächst und dann wieder abfällt,
- b) eine Welle, die sich von ihrer Anregungsebene aus symmetrisch nach beiden Richtungen gedämpft ausbreitet,
- c) eine Welle, die sich von ihrer Anregungsebene aus nur in einer Richtung ausbreitet (Abb.15).

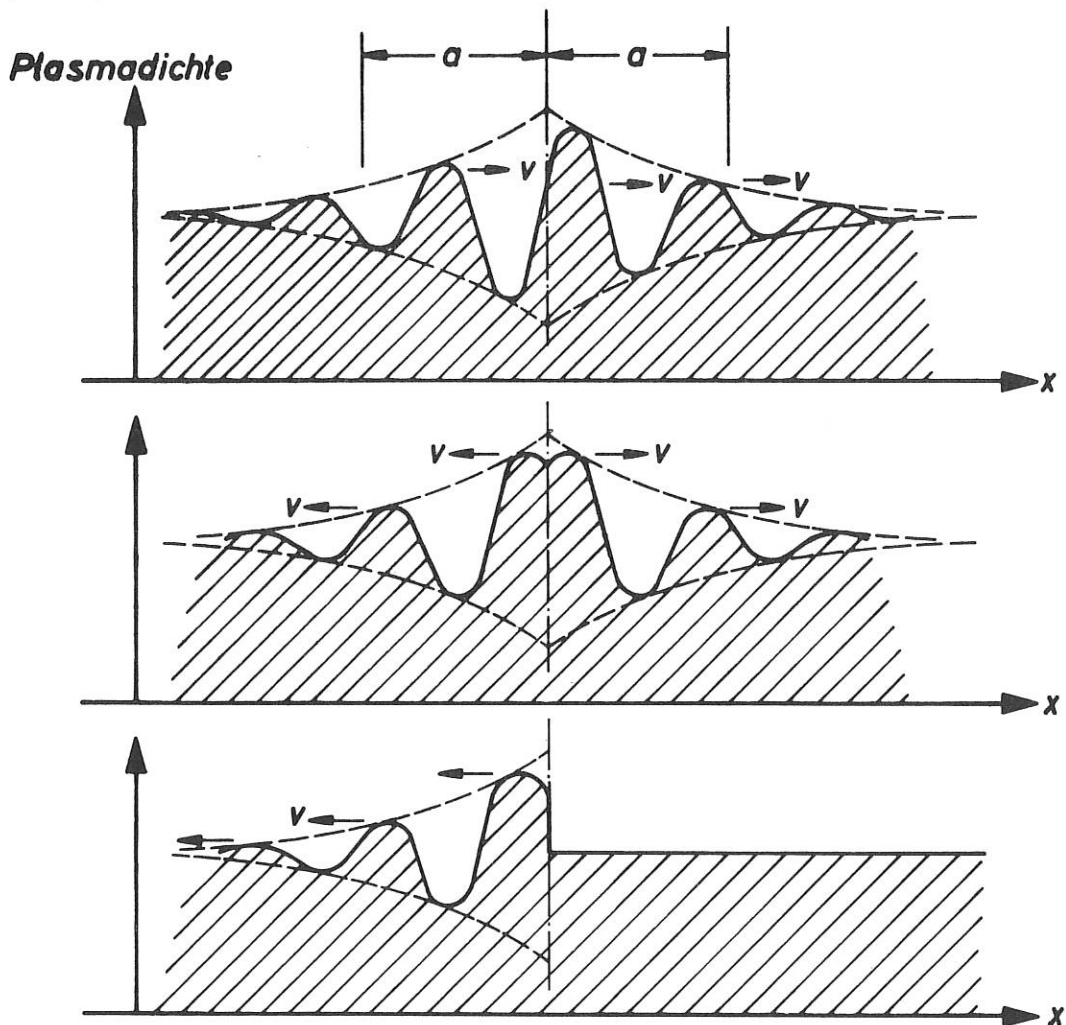


Abb. 15 Vorgegebene, zeitlich sich ändernde Dichteverteilungen als Modelle für Plasmawellen

Wir lassen dabei den physikalischen Anregungsmechanismus und die Frage nach der Möglichkeit des Auftretens solcher Wellen ausser Betracht. Die Welle nach Abb.15a wurde in einem Laborbericht (IPP IV/48) behandelt. Die Behandlung der beiden anderen Fälle ist noch nicht abgeschlossen.

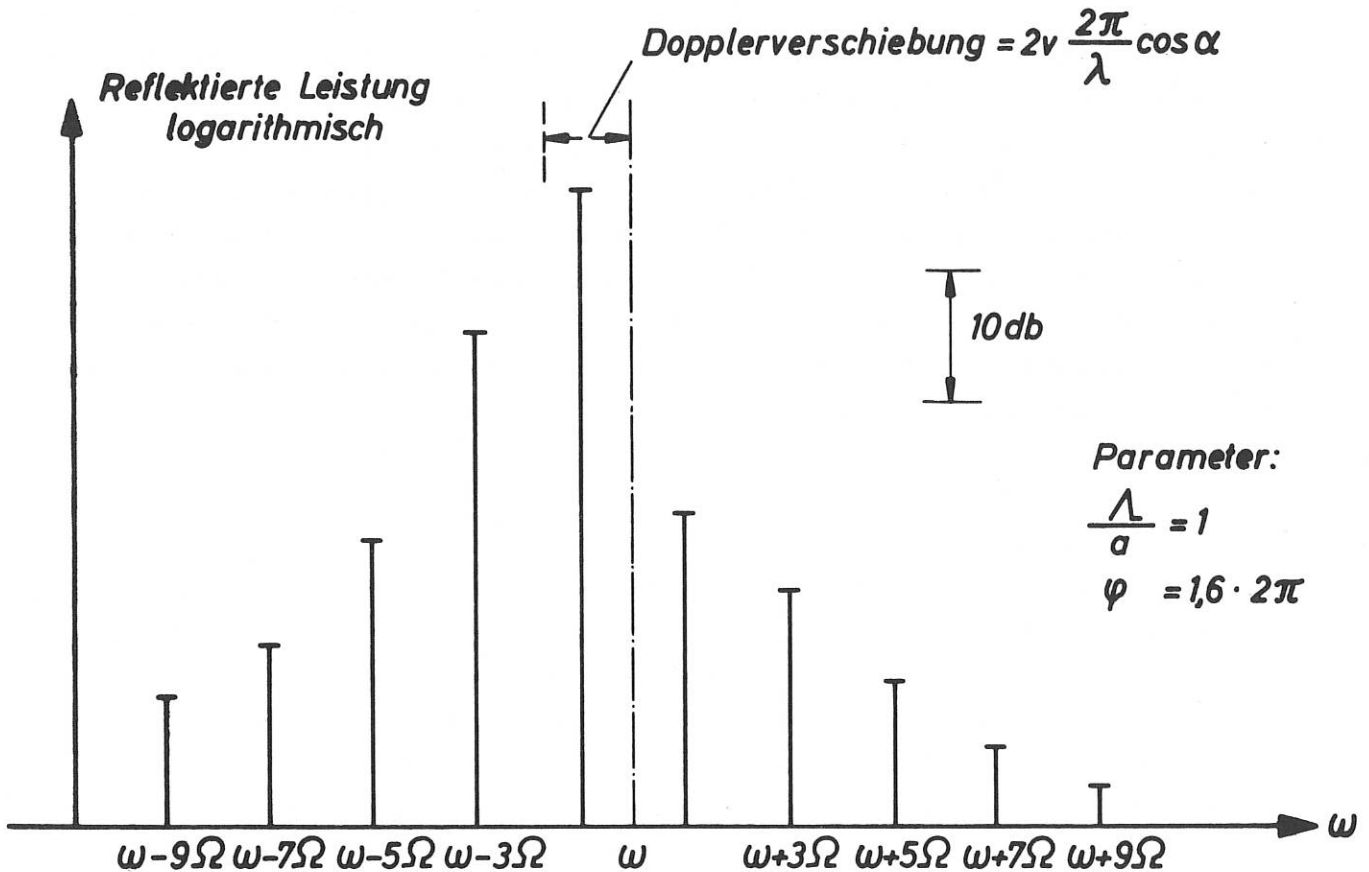


Abb. 16 Zur Plasmawelle nach Abb.15 gehöriges Reflexionsspektrum. ω ist die Kreisfrequenz der einfallenden elektromagnetischen Welle, $\Omega = 2\pi \nu/\Lambda$ ist die Kreisfrequenz der Plasmawelle

Abb. 16 zeigt als Beispiel das Reflexionsspektrum einer von links unter dem Winkel α auf die dargestellte Plasmawelle einfallenden elektromagnetischen Welle der Wellenlänge λ . Wie ersichtlich, treten nur Spektrallinien bei ungeradzahligen Vielfachen der Plasmafrequenz Ω auf. Bei unendlich ausgedehnter Plasmawelle ($a/\Lambda \rightarrow \infty$, $\Lambda =$ Plasmawellenlänge) würde nur eine Linie auftreten und nur dann, wenn die Dopplerverschiebung gleich einem ungeradzahligen Vielfachen n von Ω wäre, was mit der Erfüllung der Bragg'schen Bedingung gleichbedeutend ist, also $\omega - \omega_{\text{refl}} = n \cdot \Omega$.

6.2.2. HCN-Laser

(O. Gehre)

6.2.2.1. Laserentwicklung

Die im Jahresbericht 1971 beschriebene Konstruktion des HCN-Lasers wurde bis auf kleinere Modifikationen beibehalten. Bei guter Langzeitstabilität wurden maximale Leistungen bis 200 mW im transversalen Grundmode erreicht (IPP IV/39). Bei bestimmten Resonatorlängen L kann neben der 337 μ -Linie des HCN-Lasers auch gleichzeitig die schwächere 311 μ -Linie anschwingen. ($L = n \cdot \left(\frac{\lambda}{2}\right)_{337 \mu} = m \cdot \left(\frac{\lambda}{2}\right)_{311 \mu}$). Dies führte bei einigen Experimenten zu Interferenzerscheinungen im Ausgangsspektrum. Um dies zu vermeiden, muss während der Längenjustierung das Ausgangsspektrum beobachtet werden. Ein kleiner Teil der Ausgangsleistung wird dazu über ein Dispersionsgitter auf ein Bolometer fokussiert, welches durch Schwenken das Spektrum abtastet. Diese Anordnung erlaubte eine einfache und rasche Justierung auf die gewünschte Laserlinie.

6.2.2.2. Heterodyn-Detektor-Entwicklung

Für die Messung des schwachen Streulichts sind nur sehr empfindliche Detektoren grosser Bandbreite (heterodyner Empfang) geeignet. Über die Entwicklung sogenannter Whiskerdetektoren wurde bereits im Jahresbericht 1971 berichtet. Diese Detektoren sind vom Spitzengleichrichtertyp und werden beim Empfang der Sub-mm-Strahlung gleichzeitig als Harmonischen-Generator und als Mischer verwendet. Nach Entwicklung der notwendigen Spezialwerkzeuge zur Bearbeitung der Whisker und Halbleiterplättchen wurde in verschiedenen Detektoraufbauten die Empfindlichkeit abhängig von den verwendeten Materialien und der Kontaktierung untersucht. Bei 337 μ ergab sich als günstigste Materialkombination ein Wo-Whisker ($\varnothing 25 \mu$), der mittels einer Differentialschraube auf ein Plättchen aus einkristallinem Silizium kontaktiert wird. Die Oberfläche des Plättchens wird spiegelnd poliert, der Spitzenradius des Whiskers liegt um 0,1 μ . Der Whisker bildet dabei die Fortsetzung des Innenleiters einer Koaxialleitung, über die das heterodyne Mischsignal abgeführt wird. Die Laserstrahlung wird auf das freie Vorderteil des L-förmig gebogenen Whiskers fokussiert, der als Empfangsantenne dient und sich gleichzeitig im Feld einer 4 mm-Mikrowelle befindet. Diese Anordnung ergab bei guter mechanischer Stabilität und einfacher Justierung die beste Empfindlichkeit, wobei die Ergebnisse bei Austausch der Whisker reproduzierbar waren. Die absolute Detektorempfindlichkeit liess sich bisher nicht bestimmen, da der Signal-Rausch-Abstand durch das thermische Rauschen des nachgeschalteten Zwischenfrequenzverstärkers bestimmt wurde. Mit einem neuen, rauscharmen Verstärker sollten diese Messungen durchführbar sein.

6.2.2.3. Experimente zur Messung von HCN-Laserstrahlung

Die Anordnung zum heterodynem Empfang von $337\ \mu$ -Strahlung wurde bereits im Jahresbericht 1971 beschrieben. Abb.17 zeigt den derzeitigen Entwicklungsstand. Ein Beispiel für ein damit aufgenommenes Spektrum der Laserlinie zeigt Abb.18. Wegen der geringen Zeitkonstante

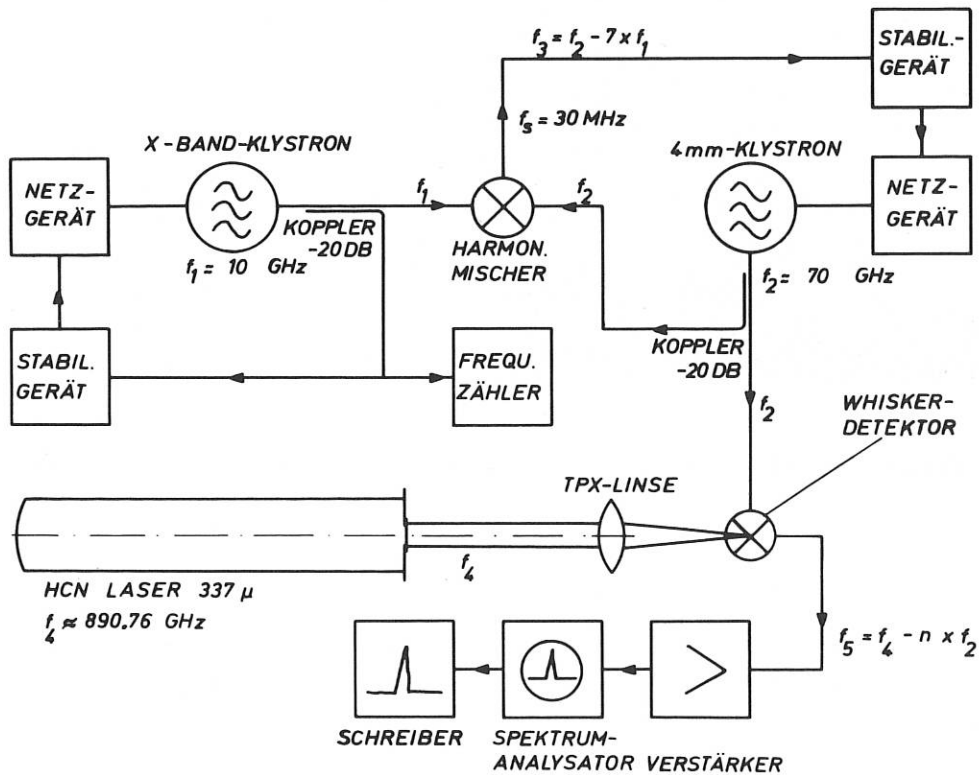


Abb. 17 Mischung von HCN-Laser-Strahlung mit einer höheren Harmonischen eines 4 mm-Klystrons

des Detektors ($\tau < 10^{-12}$ sec) liess sich diese Messung durch Variation der Lokaloszillatorfrequenz f_2 für Mischfrequenzen f_5 von einigen MHz bis zu einigen GHz ohne Empfindlichkeitsänderung durchführen. Dies ist für Streumessungen wichtig, da dabei die Mischfrequenz bei heterodynem Detektorbetrieb grösser als die reziproke Bandbreite des Streuspektrums (für typische Plasmen bei kollektiver HCN-Laser-Streuung Grössenordnung 100 MHz) sein muss. Bei den Messungen wurden maximale Signal-Rausch-Abstände von über 40 db erreicht, das dargestellte Linienprofil entspricht dabei direkt dem Profil der Laserlinie, da die zur Mischung verwendete 4 mm-Harmonische wesentlich schmaler ist. Die Halbwertsbreite der Linie liegt bei 100 kHz, was bei der verwendeten Auskopplung des HCN-Lasers grössenordnungsmässig mit der Theorie übereinstimmt. Kurzzeitige Schwankungen des Brechungsindex des aktiven Mediums im Laser täuschen eine grössere Breite vor. Eine Kurz-

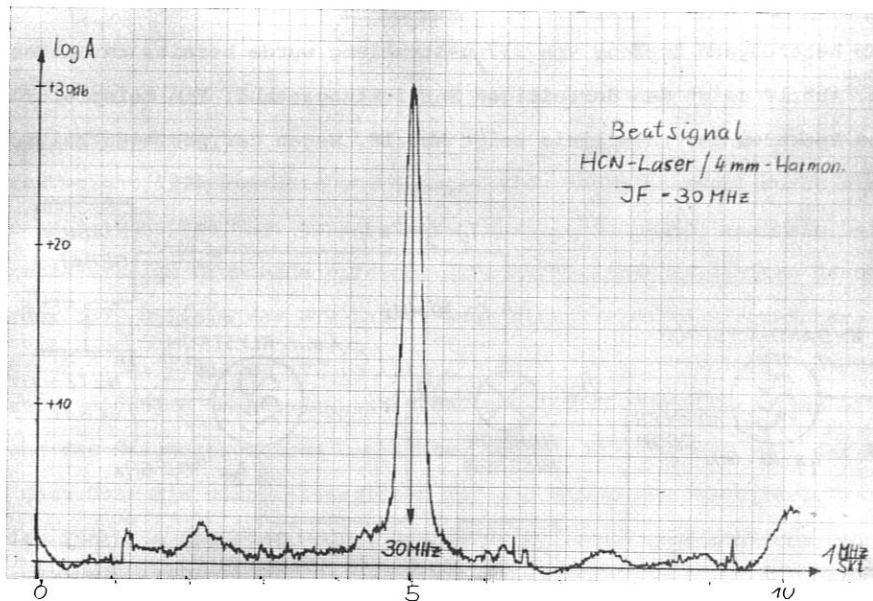


Abb. 18 Zwischenfrequenzsignal gemessen mit Anordnung nach Abb. 17

zeitstabilisierung durch Rückwirkung auf das aktive Medium über den Entladungsstrom des Lasers ist geplant. Die Weiterentwicklung dieses Empfangssystems nach höheren Empfindlichkeiten ist im Gange.

6.2.3. CO₂-Laser

6.2.3.1. Experimente zur Monochromatisierung der Laserstrahlung

(A. Gondhalekar ¹⁾, N.R. Heckenberg ²⁾)

Die für Ionentemperatur-Messungen notwendige Laserleistung wurde für zwei typische Plasmen berechnet. Daten sind in der folgenden Tabelle gegeben:

¹⁾ Ab 1.8.1972 am Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart

²⁾ Abteilung Exp. Plasmaphysik 3

Plasma	Alma III	Pulsator
Dichte	10^{12} cm^{-3}	10^{13} cm^{-3}
Elektronentemperatur	100 eV	1000 eV
Ionentemperatur	20 eV	500 eV
Streuparameter α	2,45	2,45
Länge des Streuvolumens	10 cm	25 cm
notwendige Laserleistung	12,5 MW	4 MW

Die benötigte Leistung wurde aus dem für beide Fälle berechneten Streuspektrum so bestimmt, dass sich für den ionenakustischen Peak ein Signal-Rausch-Verhältnis von 5 ergibt, wobei für den Detektor im homodynen Betrieb eine minimal messbare Leistung von 10^{-19} W angenommen wird und die Sammeloptik (Linse und Ringblende) bei 10 % Wirkungsgrad einen Winkelbereich des Streuwinkels θ von $9 < \theta < 11$ mrad erfasst, was einem Raumwinkel von $1,3 \times 10^{-4}$ sterad entspricht. Da bei dieser extremen Vorwärtsstreuung das nicht am Plasma gestreute Licht, welches den Detektor erreicht, als Lokaloszillator für die Mischung dient, ist es besonders wichtig, monochromatische Laserstrahlung zu haben. CO_2 -TEA-Laserpulse zeigen gewöhnlich starke Modulation durch Interferenz zwischen einzelnen Moden mit Beatfrequenzen der Grössenordnung 100 MHz. Um dies zu vermeiden, muss der Laser in einem transversalen und longitudinalen Mode betrieben werden.

Operation in einem transversalen Mode lässt sich mit verringerter Leistung relativ leicht durch eine Blende im Resonator oder eine entsprechende Wahl der Resonator-Konfiguration erreichen. CO_2 -Laser mit Single-Mode-Betrieb in einem longitudinalen Mode sind kommerziell nicht erhältlich, doch zeigten eigene Experimente mit einem kleinen Laser (Widerstands-Helix-Typ), dass sich dieser Betrieb ohne grosse Leistungsverluste auf mindestens 2 Arten erreichen lässt.

Eine Absorptionszelle mit SF_6 im Resonator nach Abb. 19a wirkt durch die komplexe Struktur des Absorptionsspektrums von SF_6 um $10,6 \mu$ als Modenfilter, wenn durch ein Gitter im Resonator eine Rotationslinie von CO_2 im Absorptionsbereich des SF_6 ausgewählt wird. Ebenso kann Betrieb auf einer longitudinalen Mode erreicht werden, wenn ein Resonator mit internem Gitter und zusätzlichem Spiegel (nach Abb. 19b) als Bandsperre verwendet wird. Da normalerweise nur zwei benachbarte longitudinale Moden gleichzeitig schwingen, kann eine davon durch Justierung des Abstandes Gitter - Spiegel in Abb. 19b unterdrückt werden, da die verwendete Kombination einen frequenzabhängigen Reflexionsfaktor, wie er in Abb. 19c dargestellt ist, besitzt.

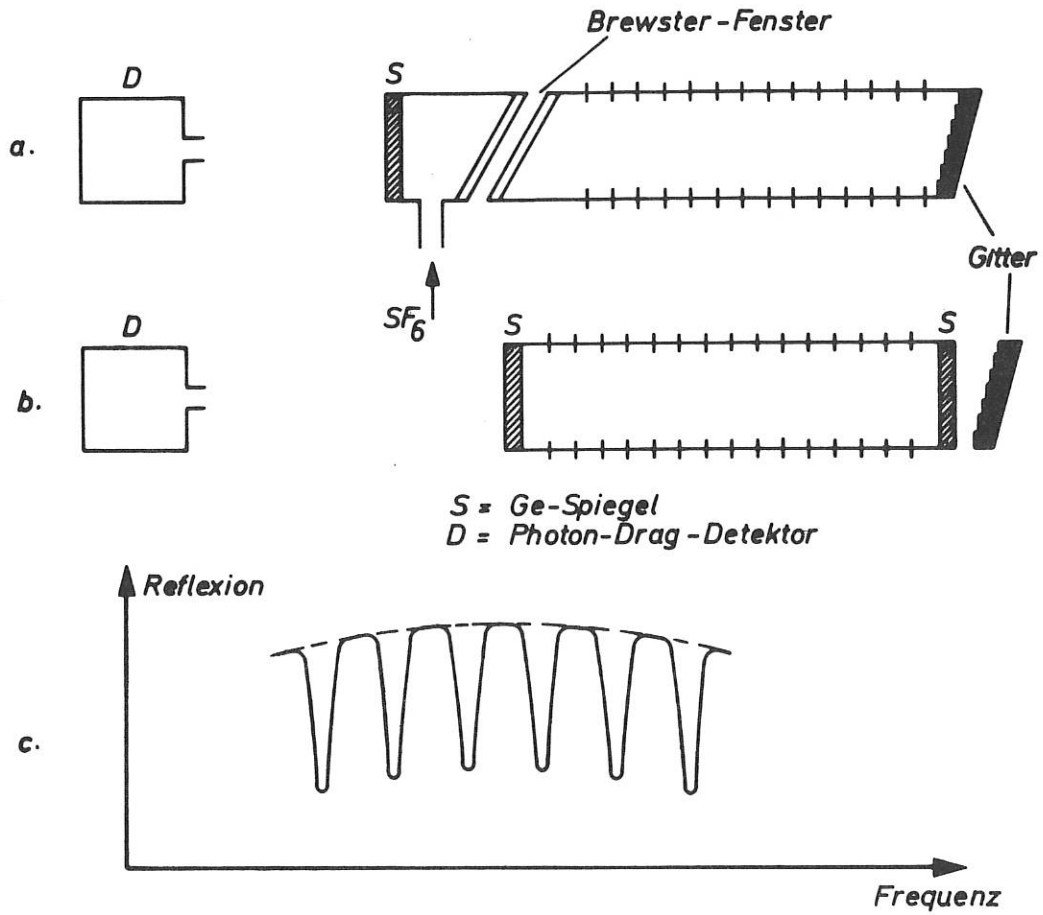


Abb. 19 Selektion longitudinaler CO_2 -Lasermode

- a) mit SF_6 Absorptionszelle
- b) mit zwei gekoppelten Resonatoren als Bandsperre
- c) Reflexionskoeffizient der Bandsperre

6.2.3.2. Homodyn-Detektor-Entwicklung

(J. Fujita¹⁾, F. Pohl¹⁾, S. Sesnic¹⁾)

Um einen besseren Mischungswirkungsgrad zu ermöglichen, müssen sowohl die Intensität als auch die Phasenverteilung von gestreutem Licht und Lokaloszillatorlicht in der Bildebene (Detektorebene) bekannt sein. Diese Verteilung ist durch die Beugungseffekte an der Ringblende, welche den Streuwellenvektor und das Streuvolumen definieren, verursacht.

Die Intensitäts- und Phasenverteilung wurde für verschiedene optische Parameter berechnet, um das optische System zu optimieren. Diese Rechnungen wurden unter der Annahme eines infinitesimal kleinen Streuvolumens gemacht. Typische Ergebnisse für das vorgeschlagene Experiment werden in der Abb. 20 gezeigt. Die Isophoten sind im Vergleich zum Fall $\epsilon = \frac{b}{a} = 0$ in axialer Richtung ausgedehnt und die Beugungsringe sind in radialer Richtung zusammengepresst. Die Konturen der gleichen Phase für zwei Bereiche, die im Intensitätsdiagramm angedeutet sind, sind auch dargestellt. Im geometrischen Fokus sind die Konturen der gleichen Phase gerade. Wo die Intensität ein Minimum besitzt, springt die Phase um π . Man kann sehen, dass sogar bei $U = 9$, wo die axiale Intensität um 20 % niedriger ist, die Konturen der gleichen Phase noch immer ziemlich gerade geblieben sind. Aus dem Verhalten der Intensität und der Phase in der Bildebene kann man schliessen, dass es möglich ist, einen Plasmazyylinder 20 cm lang und 4 mm im Durchmesser auf den Detektor abzubilden, ohne dabei den Mischungswirkungsgrad bedeutend zu verringern.

1) Exp. Plasmaphysik 3

6.3. Mikrowellen Diagnostik

6.3.1. Relativistische Theorie der elektromagnetischen Suszeptibilitäten im magnetisierten Plasma

(H. Derfler, R. O'Sullivan)

Versuche am Texas ST-Tokamak haben gezeigt, dass es im Prinzip möglich sein sollte, das poloidale Feld aus Messungen der Polarisationsrichtung von Sekundärstrahlung bei Harmonischen einer eingestrahlten Mikrowellenfrequenz zu bestimmen ¹⁾. Es ist aber noch ungeklärt, ob die beobachtete Emission von der Hybridenschicht ²⁾ oder von der Zyklotronschiicht herührt ³⁾. Die Klärung dieser Frage ist unerlässlich für die konkrete Interpretation der experimentellen Ergebnisse.

Für eine Untersuchung der Emission bei der Gyrofrequenz müssen in Richtung senkrecht zum Magnetfeld relativistische Effekte berücksichtigt werden ⁴⁾. Wir haben das entsprechende lineare Problem für ein Plasma in äusseren elektrischen und magnetischen Feldern und mit Driftgeschwindigkeiten in Richtung des äusseren Magnetfeldes \vec{B} , sowie des Vektors $\vec{E} \times \vec{B}$, in völlig kovarianter Weise gelöst und dabei eine Greensche Funktion hergeleitet, die auch für das nichtlineare Problem benutzt wird. Das lineare Verhalten des Plasmas wird in Form des Kovarianten Magnetisierungs-Polarisationstensors gegeben:

$$M_{\alpha\beta} = \left(\delta_{\alpha\beta} \delta_{\beta\sigma} - \delta_{\alpha\sigma} \delta_{\beta\beta} \right) \frac{e^2 c^2}{m \Omega^2} F^{-1} \int_0^\infty du \int d\phi f_0(u) D_{\beta\epsilon}(\phi) u_\epsilon L_{\eta\beta}(\phi) u_\sigma \exp(-i c k_\alpha L_{\alpha\beta} u_\beta / \Omega)$$

-
- 1) R. Cano, C. Etiévant. K-Hosea : Phys. Rev. Lett. 29, 1302 (1972)
- 2) I. Fidone, G. Granata, J. Teichmann: Phys. Fluids 14, 737 (1971)
- 3) R. Cano, I. Fidone, M. J. Schwartz, B. Zanfanga: Fontenay Report EUR-CEA-FC No. 613 (1971)
- 4) I. P. Shkarovsky: Phys. Fluids 9, 561 (1966)

Hierin bedeuten:

$f_0(u)$ die ungestörte Geschwindigkeitsverteilung als Funktion der Vierergeschwindigkeit u_α ,

$du = du_1 du_2 du_3 du_4 / i$ das vierdimensionale Volumenelement im Geschwindigkeitsraum,

$$D_{j\epsilon}(\phi) = \delta_{j\epsilon} - \left(\frac{e}{m\Omega}\right)^2 F_{j\kappa}^0 F_{\alpha\epsilon}^0 (\cos\phi - 1) - \frac{e}{m\Omega} F_{j\epsilon}^0 \sin\phi$$

der vierdimensionale Gyrotensor,

$$L_{\eta\rho}(\phi) = \int_0^\phi D_{\eta\rho}(\phi') d\phi'$$

der Verschiebungstensor, welcher die Spiralbahn eines Plasmaelektrons als Funktion der Eigenzeit, $\phi = \Omega \tau / c$, beschreibt.

$$\Omega = \frac{e}{m} \sqrt{F_{\alpha\beta}^0 F_{\alpha\beta}^0}$$

die relativistische Gyrofrequenz des Elektrons,

m dessen Ruhemasse und

$F_{\alpha\beta}^0, F_{\alpha\beta}^1$ die elektromagnetischen Feldtensoren nullter und erster Ordnung.

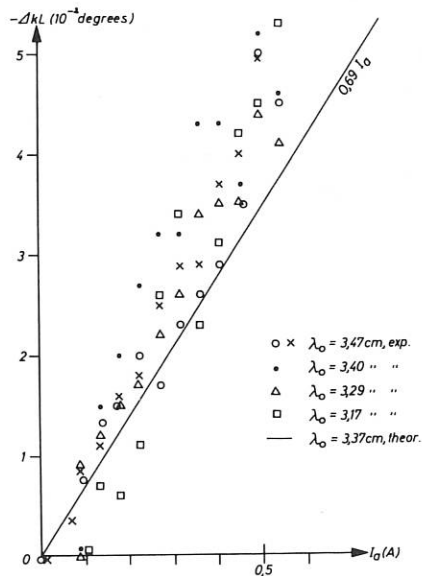
Der Tensor $M_{\alpha\beta}$ hat die Form $M_{\alpha\beta} = (\delta_{\alpha\rho} \delta_{\beta\sigma} - \delta_{\alpha\sigma} \delta_{\beta\rho}) \langle \rho x_\rho u_\sigma \rangle$ die 1921 von W. Pauli aufgrund phänomenologischer Überlegungen für ein beliebiges Dielektrikum vorgeschlagen wurde ¹⁾, wobei die Form der angedeuteten Mittelwertbildung über das Moment der Elektronenstromdichte $x_\rho \rho u_\sigma$ offen blieb. Es ist somit erstmalig gelungen, das Moment der Elektronenstromdichte für ein relativistisches Plasma anzugeben und die von W. Pauli nur angedeutete Mittelwertbildung exakt durchzuführen. Unsere Darstellung des Magnetisierungs-Polarisationstensors hat den Vorteil, dass die dielektrischen und diamagnetischen Beiträge zur Plasmastromdichte $j_\alpha = M_{\alpha\beta} k_\beta$ in physikalisch einwandfreier Weise

1) W. Pauli: "Relativitätstheorie", Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Bd. V19, B.G. Teubner, Leipzig 1921, S. 105 (Engl. Ausgabe)

dargestellt werden, im Gegensatz zu den üblichen Darstellungen des Plasmastromes im nicht-relativistischen Grenzfall, wo diese Beiträge gemischt sind ¹⁾. Gegenwärtig wird an der Näherung 2. Ordnung für die Plasmastromdichte gearbeitet, mit dem Ziele, die durch Mikrowellen stimulierte Synchrotronstrahlung zu berechnen.

6.3.2. Nichtreziproke Ausbreitungserscheinungen in plasmagefüllten Wellenleitern

(O. Gehre, H.M. Mayer, M. Tutter)



Die im Vorjahresbericht erwähnten experimentellen und theoretischen Untersuchungen über den Einfluss bewegter Plasmen und Dielektrika auf die Ausbreitung in Wellenleitern wurden zusammenfassend dargestellt ²⁾, ³⁾. In ²⁾ wird der Einfluss einer mehrschichtigen Füllung mit stückweise konstantem Geschwindigkeits- und ϵ -Profil untersucht. in ³⁾ werden u.a. Messungen an einer Glimmentladung beschrieben, die durch das in ²⁾ behandelte Modell in Verbindung mit früheren Rechnungen /104/ eine befriedigende Erklärung finden (siehe Abb.21).

Abb. 21 Nichtreziproke Ausbreitung der H_{11} -Welle in einem Hohlleiter in welchem längs einer Strecke L in Achsenrichtung eine Glimmentladung brennt.

ΔkL = durch Elektronendrift verursachte Phasenverschiebung bei Ausbreitung der Mikrowellen in Strömungsrichtung

I_a = Anodenstrom der Glimmentladung

Punkte = Messungen bei verschiedenen benachbarten (Vakuum-) Wellenlängen λ_0 ³⁾

Ausgezogene Kurve = berechnete Kurve nach ²⁾ und /104/

¹⁾ B. Stix: "The Theory of Plasma Waves", McGraw Hill New York (1962), S. 186

²⁾ O. Gehre, H.M. Mayer, M. Tutter: "Nonreciprocal Propagation of Guided Waves in Sliding Laminae of Isotropic Dielectrics", wird veröffentlicht in Z. f. Naturforsch.

³⁾ O. Gehre, H.M. Mayer, M. Tutter: "Nonreciprocal Microwave Interferometry of Moving Media and Structures", wird veröffentlicht in Z. f. Naturforsch.

THEORIE (Prof.Dr.D.Pfirsch)

Magnetohydrodynamische Gleichgewichts- und Stabilitätsrechnungen führten zur Bestimmung kritischer β -Werte und von Anwachsraten von Instabilitäten bei endlicher Wandleitfähigkeit sowie zu Aussagen über Plasmaströmungen in toroidalen Anordnungen. Die Frage nach der Existenz eines bootstrap Stroms in Stellaratoren wurde untersucht. Neoklassische Rechnungen zeigten nur einen geringen Einfluß eines durch starke Magnetfelder modifizierten Stoßterms. Eine genauere Diskussion des Plateaugebietes ist im Gange. Gleichgewichte, Einschubvorgänge und Heizraten mit relativistischen Elektronenstrahlen wurden bestimmt. Im Rahmen der mikroskopischen Theorie wurden elektrostatische Instabilitäten in inhomogenen Systemen untersucht, deren Wellenlängen nicht notwendig groß gegenüber den Gyroradien sein müssen. Turbulente Heizung, Burgers-Turbulenz, mit Gauß-Maßen lösbare Turbulenz, turbulente Diffusion, schwache Turbulenz der Phononenkinetik sowie statistische Geometrie, wurden im Rahmen der Turbulenztheorie behandelt. Umfangreich waren die numerischen Rechnungen auf der Basis makroskopischer Modelle zum Verhalten von Tokamak- und Stellaratorplasmen. Eine Vielzahl axialsymmetrischer Gleichgewichte vom Bandpinchtyp und von Tokamaks mit Separatrix im Magnetfeld wurden numerisch bestimmt. Die Plasmasimulationsrechnungen wurden fortgeführt, erste Vorbereitungen für die Behandlung toroidaler Systeme wurden getroffen. Im Hinblick auf die numerischen Untersuchungen wurden Programme für nichtlineare partielle Differentialgleichungen und Programmgeneratoren entwickelt, Differenzenschemata untersucht, ein Poisson-Solver für Torusgeometrie bereitgestellt u.a.m. Eine intensive Zusammenarbeit mit Princeton auf dem Gebiet der numerischen Plasmamodelle wirkt sich sehr positiv aus.

1. Makroskopisches Gleichgewicht und Stabilität

1.1 Toroidale Gleichgewichte mit verschiedenen Korrugationsfeldern bei endlichem β und ohne Längsstrom

- a) Kombination von $\ell = 0, 1$ Feldern in führender Ordnung (J. Nührenberg, zusammen mit F. Herrnegger)

Die Existenz eines entwickelbaren toroidalen magneto-hydrostatischen endlich- β Gleichgewichts ohne Längsstrom, mit endlicher Rotationstransformation, jedoch ohne Pfirsch-Schlüter Effekt [1], wurde für die Kombination von $\ell = 0$ (d.h. M&S) und $\ell = 1$ (helikal symmetrischen) Feldern untersucht [2]. Dafür wurde folgende Skalierung benutzt, die sich gegenüber anderen (z.B. [3]) durch relativ kleine charakteristische Längen im Vergleich zum Plasmaquerschnitt auszeichnet:

$$a \overset{0}{k} \sim \epsilon, \quad 2\pi a/L_p \sim 1, \quad a \overset{0}{r} \sim 1, \quad a/R_T \sim \epsilon^2$$

(a kleiner Plasma- oder Gefäßradius, $\overset{0}{k}$ Krümmung der Seele in niedrigster Ordnung, ϵ Entwicklungsparameter, L_p Periodizitätslänge, $\overset{0}{r}$ Torsion niedrigster Ordnung, R_T großer Torusradius). Das wesentliche Ergebnis erhält man aus einer Integrabilitätsbedingung, die in zweiter Ordnung auftritt. Diese Bedingung legt die Variation des Feldes in Richtung der Seele längs der Seele in ähnlicher Weise wie in [4] fest. Darüberhinaus folgt aus ihrer Erfüllung über den ganzen Plasmaquerschnitt auch das Druckprofil und damit bei gegebener Plasmaquerdimension der β -Wert. Das Profil ist näherungsweise (für $a \overset{0}{r} \leq 1$) parabolisch im Abstand von der Seele und

$$\beta = 2 p(0)/B(a)^2 \approx \frac{5}{17} a^2 \overset{0}{r}^2 / (1 + \frac{5}{17} a^2 \overset{0}{r}^2).$$

- b) Kombination von $\ell = 0, 1, 2$ Feldern

Für eine solche Kombination, in der das $\ell = 2$ Feld die doppelte helikale Periodizitätslänge des $\ell = 1$ Feldes haben muß, erhält man in zweiter Ordnung zwei Integrabilitätsbedingungen. Die Freiheit im Druckprofil genügt nicht, beide zu erfüllen. Im Sonderfall verschwindender M&S-Korrugation ist die dann auftretende eine Bedingung analog zu a) erfüllbar. Für den β -Wert ergibt sich

$$\beta \approx 2a^2 \overset{0}{r}^2 / (1 + 2a^2 \overset{0}{r}^2).$$

Berücksichtigt man bei nicht verschwindender $\ell=0$ Korrugation nur diejenige der beiden Bedingungen, die das Kraftgleichgewicht bzgl. der Torus-Driftkraft beinhaltet, so wird β ein freier Parameter. Für $\beta \geq 2a^2 \overset{0}{r}^2$ ergibt sich die $\ell = 0$ Korrugation als klein gegen die $\ell = 2$ Korrugation.

1.3. Nichtexistenz eines "bootstrap" Stroms im Stellarator. (D. Pfirsch)

Der Beweis von Kruskal und Kulsrud der Nichtexistenz eines diffusionsgetriebenen toroidalen Stroms in Stellaratoren im Rahmen der MHD wurde ausgedehnt auf eine makroskopische Theorie, die sich als Grenzfall für Gyrofrequenzen groß verglichen mit den Stoßfrequenzen und kleinen freien Weglängen aus den kinetischen Gleichungen ergibt. Die Theorie enthält anisotrope elektrische Leitfähigkeiten und thermo-elektrische Effekte. Damit ist gezeigt, daß auch für diesen, im Zusammenhang mit der neoklassischen Theorie interessanten Grenzfall, keine allgemeine Relation zwischen Diffusion und toroidalem Strom bestehen kann.

1.4 MHD-Stabilität von helikalsymmetrischen Gleichgewichten (D. Correa, D. Lortz)

Notwendige und hinreichende MHD-Stabilitätskriterien wurden in der Nähe der magnetischen Achse auf helikalsymmetrische Gleichgewichte angewandt. Ist die magnetische Achse eine Gerade, so wird das notwendige Kriterium nur im Fall kreisförmiger magnetischer Flächen marginal erfüllt. Hat die magnetische Achse die Form einer Schraubenlinie und sind die achsen-nahen magnetischen Flächen dreiecksähnlich deformierte Ellipsen, so kann Stabilität erzielt werden.

1.5 Kritisches β in Quadrupol-Konfigurationen (D. Lortz, E. Rebhan)

Für lineare Quadrupol-Konfigurationen mit $p = 0$ am Plasmarand und außen anschließendem Vakuumfeld wurden ein notwendiges und ein hinreichendes MHD-Stabilitätskriterium numerisch untersucht. Für die numerische Behandlung war es von großem Vorteil, daß eine analytische Lösung der Gleichgewichtsgleichungen gefunden wurde. Das resultierende kritische β , das aus dem hinreichenden Kriterium folgt, ist nur wenig kleiner als das aus dem notwendigen folgende. In beiden Fällen ergab sich ein Wert von ca. 2 %.

1.6 Die Stabilität eines Pinches mit endlich leitfähiger Wand. (J.P. Goedbloed[†], D. Pfirsch, H. Tasso)

Ein Pinch Gleichgewicht mit Oberflächenströmen, von einem kraftfreien Magnetfeld und einer perfekt leitenden Wand umgeben, kann MHD stabil sein. Sobald die Wand eine endliche Leitfähigkeit besitzt, wird die Konfiguration instabil. Die Anwachszeit der Instabilitäten ist, für Fusionsreaktoren mit geringer Dichte ($n \approx 10^{14}$), viel kleiner als die notwendige Einschließungszeit die durch das Lawsonkriterium gegeben ist.

[†]Goedbloed, J.P., FOM-Institut voor Plasmafysica Ass. EURATOM-FOM, Rijnhuizen, Jutphaas, Netherlands

c) Beliebiges Druckprofil

Die Ergebnisse von a) und b) zeigen, daß in der benutzten Skalierung eine notwendige Bedingung für die Lösbarkeit der Gleichgewichtsgleichungen in zweiter Ordnung bei beliebigem Druckprofil das Auftreten von unendlich vielen Korrugationskomponenten in erster Ordnung ist. Dies kann eine Schwierigkeit bei der Gleichgewichtserzeugung und -erhaltung sein für Gleichgewichte des betrachteten Typs. Die Untersuchung ist noch nicht abgeschlossen.

1.2 Instabilität von Gleichgewichten in der Nachbarschaft des Θ -Pinches. (J. Nührenberg)

Im Zusammenhang mit der Tatsache, daß helikale Gleichgewichte instabil sind, wenn sie durch kleine Abweichungen vom Θ -Pinch beschrieben werden können ([5], [6]), wurde vermutet, daß alle Gleichgewichte in der Nachbarschaft des gewöhnlichen zylinder-symmetrischen Θ -Pinches instabil seien. Der Beweis ist aus folgendem Grund wichtig: I.a. enthält das notwendige Kriterium von Mercier Terme, die vom Druckabfall in der Nähe der magnetischen Achse her-rühren und zur Existenz eines kritischen β -Wertes führen, oberhalb dessen Instabilität vorliegt. Als Folge der Marginalität des Θ -Pinches läßt sich für Konfigurationen in seiner Nachbarschaft zeigen, daß Mercier's Stabilitätskriterium unabhängig vom Druckabfall in der Nähe der magnetischen Achse und damit unabhängig von β wird. Leider erweist sich Instabilität, da das Kriterium folgende Gestalt annimmt:

$$\frac{1}{4} \oint \frac{ds}{B_0^2} \left\{ \eta'^2 + 3 \left(\frac{B_0'}{B_0} - \frac{2}{3} \eta' \eta \right)^2 + \frac{\lambda^2}{4} + \eta^2 (d' - 2\tau)^2 \right\} + \oint \frac{\kappa^2 ds}{B_0^2} < 0$$

worin B_0 das Feld auf der Seele, e^η das Halbachsenverhältnis des elliptischen Plasmaquerschnitts, ' die Ableitung nach der Bogenlänge, d' die Drehung der Ellipsen beim Fortschreiten längs der Seele, $\lambda = J_0/B_0$ den Längsstrom auf der Seele, κ die Krümmung und τ die Torsion der Seele beschreiben und η , B_0' , λ und κ von erster Ordnung im Kleinheitsparameter $a\kappa$ sind, wo a den Plasma-radius beschreibt. Die Relevanz des Ergebnisses ist insofern nicht klar, als es über das Stabilitätsverhalten nicht-lokalisierter Störungen, die die einzigen bisher in Θ -Pinch Anordnungen beobachteten sind, keine Aussage macht.

Ein Nebenergebnis ist der Vergleich des Mercier-Kriteriums mit einem Kriterium von Shafranov [7]

$$(\langle B^2 \rangle \langle 1/B^2 \rangle + 1) \dot{p} + \langle B^2 \rangle' > 0$$

(für $\dot{p} < 0$, wo ' die Ableitung nach dem Volumen innerhalb der magnetischen Flächen bedeutet) für den Fall verschwindenden Längsstroms und kleiner Rotationstransformation pro Periodizitätslänge. Es läßt sich allgemein zeigen, daß das Mercier-Kriterium einschränkender als obiges Kriterium ist, und es gibt spezielle Konfigurationen (z.B. endlich- β helikale Gleichgewichte mit $\beta > a^2 \tau^2$), für die es erfüllt, das Mercier-Kriterium jedoch verletzt ist. In diesen Fällen ist die Modenanalyse besonders wichtig.

[1] J.Nührenberg, Nucl.Fusion 12(1972), 383.

[2] F.Herrnegger, J.Nührenberg, Proceedings of the Second Topical Conference on Pulsed High-Beta Plasmas (1972), 49.

[3] H.Weitzner, Phys.Fluids 14 (1971), 658.

[4] F.L.Ribe, M.N. Rosenbluth, Phys. Fluids 13(1971), 2572.

[5] V.D.Shafranov, Nucl.Fusion 8 (1968), 253.

[6] D.Correa Restrepo, Dissertation Univ. München (1973).

[7] V.D.Shafranov, Plasma Physics 13 (1971) 349.

1.7 Einfluß eines Limiters auf die MHD Stabilität eines Kreiszyklindrischen Plasmas mit uniformer Stromverteilung. (W.Kreyling, D.Pfirsch, H.Tasso)

Wenn ein Axialfeld existiert, dann läßt der Limiter nur noch Störungen zu, die die Plasmaoberfläche nicht in radialer Richtung bewegen. Das Ergebnis ist streng zu nehmen, wenn Plasma und Limiter perfekt leitend sind.

1.8 Stabilitätsverhalten eines MHD-Plasmas im elliptischen Zylinder mit Oberflächenströmen. (G.Lotz, D.Pfirsch, H.Tasso)

Die Energiestörung in dem Plasma kann streng minimalisiert werden. Das Vakuumintegral muß noch numerisch behandelt werden. Die jetzigen Rechnungen deuten darauf, daß $m = 1$ instabil wird, wenn die normierte Rotationstransform $\frac{1}{2\pi}$ größer 1 ist. Dafür erscheinen höhere m Moden für $\frac{1}{2\pi} < 1$. Die Behandlung des Vakuumintegrals wird fortgesetzt.

1.9 Toroidale Gleichgewichte mit Strömung. (B.J.Green, H.P.Zehrfeld⁺)

Die Injektion von Teilchen in Plasmen toroidaler Apparaturen ist in der letzten Zeit in verstärktem Maße Gegenstand experimenteller und theoretischer Untersuchungen. Die zur Heizung oder zur Aufrechterhaltung der Teilchendichte verwendete Injektion ist mit einer nicht unbeträchtlichen Übertragung von Impuls auf das Plasma im Einschlußbereich verbunden. Selbst wenn es gelingt, den Nettoübertrag zum Verschwinden zu bringen, bleiben lokale Effekte /1/, die zur Ausbildung von Strömung führen.

Strömungen in selbstkonsistenten toroidalen Gleichgewichtskonfigurationen führen zu Dichteveränderungen auf magnetischen Flächen, zu einer geänderten räumlichen Abhängigkeit des für die Stabilitätseigenschaften des Plasmas wichtigen toroidalen Magnetfeldes und zu einer Rückwirkung dieser Effekte auf Lage und Form der magnetischen Flächen. Rotation erhöht den Diamagnetismus des Plasmas. Vorzeichen und Größe der Plasmaverschiebung hängen wesentlich von der Form des radialen Profils der kinetischen Energiedichten ab. Die Krümmungseigenschaften nicht kreisförmiger Querschnitte magnetischer Flächen führen in der Bilanz radialer Kräfte auf das Plasma zu einer Betonung zentrifugaler Effekte und sind damit für Konfigurationen mit immateriellem Limiter von Wichtigkeit.

1.10 Stationäre selbstkonsistente Gleichgewichte. (J.E.Mc Cune, K.U.v.Hagenow)

Stationäre, selbstkonsistente Gleichgewichte mit endlicher skalarer Leitfähigkeit und axialer Symmetrie wurden mit Hilfe einer Entwicklung nach dem reziproken Aspektverhältnis untersucht. Im Gegensatz zur üblichen Tokamak-Skalierung ist hier das Verhältnis von toroidalem zu poloidalem Feld von der Ordnung der Quadratwurzel aus dem Aspektverhältnis. Es konnte ein Ordnungsschema gefunden werden, mit dem toroidale Effekte wie Shaffranov-Verschiebung, Pfirsch-Schlüter Diffusion, Einfluss der Rotation auf die Diffusion durch direkte Störungsrechnung gewonnen werden. Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung echt stationärer Lösungen mit vorgeschriebener Quellverteilung. U.a. konnten wir zeigen, daß mit einer lokalen Quelle bei skalarer Leitfähigkeit keine rotierende stationäre Lösung existiert.

/1/ Callen J.D. and Clarke J.F. Bull. Am. Phys. 16 (1971) 1261

1.11 Ein einfaches stationäres Dynamomodell. (D.Lortz)

Für das kinematische Dynamoproblem wurden stationäre Lösungen mit folgender Eigenschaft gefunden: Außerhalb eines Kreistorus ist das Magnetfeld das axialsymmetrische Vakuumfeld des kreisförmigen Drahtes. Innerhalb des Torus haben das Magnetfeld und das Geschwindigkeitsfeld im Grenzfall großen Aspektverhältnisses helikale Symmetrie.

2. Makroskopische numerische Modelle

2.1 Zur numerischen Bestimmung axialsymmetrischer MHD-Gleichgewichte. (K.U.v.Hagenow, K.Lackner)

Es wurden Iterationsverfahren zur Bestimmung axialsymmetrischer Gleichgewichte mit weitgehend beliebiger Stromverteilung entwickelt, die auch dann konvergieren, falls das Problem mehrere Lösungen hat. Es wurden damit Belt-Pinch-artige Gleichgewichte mit verschiedenen Plasma-Stromverteilungen und umgebendem Vakuumfeld bestimmt, wobei das Plasma und Magnetfeld entweder von ideal leitenden Wänden oder durch Ströme externer Leiter gehalten wird. Wenn man die Spiegelströme des ersten Falles auf die diskreten Leiter des zweiten Falles gibt, erhält man nahezu ideale Übereinstimmung.

2.2 Multipol Tokamak Gleichgewichte. (W.Feneberg, K.Lackner)

Siehe: Bericht der Abteilung 3.

2.3 Radialer Transport in Tokamak-Entladungen. (D.Düchs, H.P.Furth⁺, P.H.Rutherford⁺)

Dichte, Temperaturen und Felder von Tokamakplasmen werden berechnet als Funktionen der Zeit und des Abstandes von der Torusseule. Die "reine" neoklassische Theorie für das Bananen- und Plateaugebiet liefert Aussagen über die radialen T_e - und n -Profile, sowie über die Einschlußzeiten für Teilchen und Energie, die mit den experimentellen Ergebnissen nicht übereinstimmen (Phys. Rev. Letters).

Die Berücksichtigung von Neutralgas (Ionisierung, Ladungsaustausch in vier Stufen) kann die beobachtete obere Grenze für Dichte und Strom erklären (Grenoble-Konferenz).

Die am ST-Tokamak gemessenen Profile konnten jedoch nur unter der Annahme anomal hoher Wärmeleitfähigkeit für Elektronen, anomaler Diffusion und erhöhten, elektrischen Widerstandes berechnet werden (Semi-empirisches, pseudoklassisches Modell, Bull. Am. Phys. Soc.).

⁺ Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, N.J., U.S.A.

Der Einfluß von Sauerstoffverunreinigungen wird abgeschätzt durch die (lokale) Lösung der Ratengleichungen für Ionisierung und Rekombination. Diffusion der Verunreinigungen ist noch nicht berücksichtigt. Verschiedenartige Randbedingungen (Mithberechnung des elektrischen Außenkreises, Expansion und Kompression von Tokamakplasmen, usw.) wurden untersucht. Das gegenwärtige halbempirische Tokamakmodell führt bei größeren Tokamaks zu starkem Skin-Effekt. Wird dieser durch Erhöhung der Anomalien unterdrückt, muß man mit einer sehr hohen Limiterbelastung rechnen (Nucl. Fusion)

2.4 Axiale Struktur des Plasmas bei der Zündung von Thetapinch-Entladungen.
(R.H.Dixon⁺⁺, D.Düchs, R.C.Elton⁺⁺)

Zweidimensionale (r,z,t) optische Beobachtungen an Thetapinch- und Hard Core Thetapinch-Entladungen haben ergeben, daß sich schon bei der Zündung eine axiale (z) Struktur des Plasmas ausbildet. Beim (topologisch toroidalen) Hard Core Pinch formt sich das Plasma dann zu einer Spirale (IPP 1/127). Die am NRL, Washington, gewonnenen Messungen wurden ausgewertet. Mit bekannten Theorien konnten die Erscheinungen bei der Zündung bisher nicht erklärt werden.

2.5 Wärmeleitung und Dynamik für sehr dichte Plasmen. (D.Düchs, U.Schwenn⁺⁺⁺)

Bei der Berechnung von Kompressions-, Expansions- und Wärmeleitungsvorgängen in lasererzeugten Plasmen treten sehr steile Gradienten auf, die besondere Anforderungen an die Differenzenschemata stellen. Für ebene, zylindrische und sphärische Geometrie wurden streng zentrierte, implizite, im wesentlichen Euler'sche Schemata auf ihre Eignung geprüft. Vergleiche mit analytisch lösbaren, einfachen Grenzfällen ergaben sehr gute Übereinstimmung.

2.6 Numerische Behandlung von nichtlinearen Diffusionsgleichungen.
(D.Düchs, K.Graf Finckenstein, K.v.Hagenow)

Es wurden numerische Untersuchungen an nichtlinearen Anfangs-Randwertproblemen durchgeführt, die sich aus zylindersymmetrischen Diffusions- und Wärmeleitungsproblemen in einem magnetisierten Plasma ergeben. Durch umfangreiche numerische Experimente wurde die Brauchbarkeit zahlreicher Verfahren geprüft. Bei einigen dieser Verfahren sind exakte mathematische Konvergenzbeweise gelungen.

⁺⁺ Naval Research Laboratory, Washington, D.C., USA

⁺⁺⁺ Exptl.Abt.4

3. Transportphänomene und Turbulenz

3.1 Diffusion in einem toroidalen Plasma bei mittleren Stoßfrequenzen (Plateaugebiet). (K.Borrass)

Die bisherigen Berechnungen des Diffusionskoeffizienten im Plateaugebiet basieren auf zwei Annahmen, die unverträglich sind. Um diesen Mangel zu beheben, wurden bei der Rechnung der volle Lorentzgasstoßterm benutzt und azimutale elektrische Felder berücksichtigt. Es zeigt sich, daß die Verteilungsfunktion so additiv zerlegt werden kann, daß gilt:
 Der eine Anteil berücksichtigt das E-Feld vollständig. Sein Beitrag zum Diffusionskoeffizienten gehorcht der Pfirsch-Schlüter-Formel.
 Der zweite Anteil gehorcht einer Gleichung, die das E-Feld nicht mehr enthält. Dieses Problem kann als änguläres Störungsproblem bezüglich der Stoßfrequenz behandelt werden. Die Auswertung ist noch nicht abgeschlossen.

3.2 Neoklassischer Plasmatrtransport in einem starken Magnetfeld.⁺ (C.T.Dum, D.Pfirsch)

Der Einfluss eines starken Magnetfeldes $\Omega_e > \omega_p$ auf Coulombstöße wurde untersucht. Die Resultate wurden auf den neoklassischen Transport angewendet. Anders als bei der Gyrozentren-Diffusion treten hier keine wesentlichen Modifikationen auf, außer für extrem starke Magnetfelder. ($\Omega_e \sim \omega_p \times$ Zahl der Teilchen im Debye-Volumen).

3.3 Plasmaeinschluss in einem gewellten Magnetfeld. (C.T.Dum, D.Pfirsch)

Es wurde untersucht welche Verbesserungen des Plasmaeinschlusses mit einem gewellten Magnetfeld gegenüber einem einfachen geraden θ -Pinch erzielt werden können.

Es zeigte sich, daß das von Budker et. al vorgeschlagene System durchaus interessante Verbesserungen bei Plasmaversuchen bringen könnte. Für ein thermonucleares Plasma reduziert sich jedoch die erforderliche Länge des Pinches nicht ausreichend um ein attraktives Reaktorsystem zu erhalten.

3.4 Strahlungsverluste durch Sauerstoffverunreinigungen in Plasmen. (D.Düchs, W.Engelhardt⁺⁺, W.Köppendörfer⁺⁺)

Die Ratengleichungen für alle Ionisierungsstufen von Sauerstoff werden numerisch gelöst und die Linienstrahlung, Bremsstrahlung und Ionisierungsverluste berechnet. Man kann eine normierte Zeit und einen normierten Emissionskoeffizienten einführen, so daß sich die Strahlungsverluste unabhängig von der Elektronendichte darstellen lassen.

⁺C.T.Dum and Dieter Pfirsch, Paper Nr.23, European Conference on Plasma Physics, Grenoble 1972

⁺⁺Exp.Abt. 1

3.5 Turbulente Plasmaheizung. (C.T.Dum)

Resultate einer großen Zahl von Experimenten zur turbulenten Heizung des Plasmas wurden analysiert im Hinblick auf die auftretenden physikalischen Vorgänge und insbesondere um Skalierungsgesetze abzuleiten. Der anomale Widerstand wird im Großteil der Experimente durch die Ionenschallinstabilität verursacht. Die effektive Stoßfrequenz,

$$\nu_{\text{eff}} \sim \omega_e \frac{w^S}{nT_e}$$

wobei: ω_e Plasma Frequenz $\frac{w^S}{nT_e}$ rel. Intensität des Ionenschalls $\sim 10^{-2}-10^{-3}$; sie ist unabhängig vom Strom, solange die Driftgeschwindigkeit hinreichend hoch über der kritischen Geschwindigkeit, $u_{kr} \approx 1-10 c_s$ liegt. Liegt die Driftgeschwindigkeit nicht wesentlich über der kritischen Geschwindigkeit, stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Dissipation und Verlusten ein. Bei höheren Driftgeschwindigkeiten schaltet sich die Instabilität aus noch vor Erreichen der maximalen Driftgeschwindigkeit. Nur wenn die Anwachsrate des Stromes sehr hoch ist, wird das Regime der Zweistrahl (Buneman) Instabilität, in dem $\omega \sim \gamma \sim \nu_{\text{eff}} \sim \left(\frac{m}{M}\right)^{1/3} \omega_e$, erreicht. Dieses Regime besteht nur, solange die Driftgeschwindigkeit wesentlich über der thermischen Elektronengeschwindigkeit liegt. Das für die Heizung wirksame Ionenschallregime kann auch durch die "current convective instability" beendet werden. Turbulente Heizung kann sehr effektiv sein, wenn es gelingt, den Verlauf des Heizstromes den Gesetzmäßigkeiten der Ionenschall-Instabilität anzupassen.

3.6 Heizung eines Plasmas mittels relativistischer Elektronenstrahlen.
C.T.Dum, R.N.Sudan[†]

Es wurde die Heizung eines dichten Plasmas mittels relativistischer Elektronenstrahlen ($n_b \ll n_p$) untersucht.

Die Heizung kann im wesentlichen durch zwei Mechanismen erfolgen: die hochfrequente Strahl-Plasma Instabilität ($\omega \sim \omega_e$) und die anomale Dissipation des im Plasma induzierten Rückstromes. Das vom Strahl erzeugte intensive Plasmawellenspektrum kann nur aufgrund nichtlinearer Prozesse mit dem thermischen Plasma wechselwirken. Dabei erweist sich die nichtlineare Kopplung mit dem gleichzeitig anwesenden, niederfrequenten Schwingungen ($\omega \sim \omega_{\perp}$) als sehr wirksam.

Die Heizung mittels des Plasmarrückstromes ist ähnlich der in anderen Experimenten zur turbulenten Heizung. Sie hat jedoch den großen Vorteil, daß sehr große Ströme in äußerst kurzer Zeit ein- und ausgeschaltet werden können. Dies ist für eine effektive Heizung sehr wesentlich (siehe oben).

3.7 Turbulente Diffusion I. (P.Gräff)

Injiziert man sehr leichte Test-Teilchen in ein turbulentes Medium, so werden sie praktisch sofort mitgerissen (Reynolds'sche Indikatortinte). Was sind die Übergangswahrscheinlichkeiten? Die Theorie der Brown'schen Bewegung ist nicht a priori anwendbar. Es wurden aber die Schwinger- und Hopfgleichung abgeleitet.

[†]Cornell University, Ithaca, New York, USA

3.8 Das Umkehrproblem der Turbulenz. (P.Gräff)

Zweidimensionale Euler-Turbulenz ist statistisch exakt mit Gaußmaßen lösbar. Daher kann man fragen: Welche nichtlinearen Bewegungsgleichungen lassen dies ebenso zu? Eine volle Übersicht wurde gegeben.

3.9 Statistische Geometrie. (P.Gräff)

Sieht man die Zusammenhangskomponenten (oder die Metrik) einer Geometrie als turbulent an, so ist eine statistische Behandlung nahegelegt. Die Dyson-Gleichung der Parallelverschiebung und Symmetrien wurden diskutiert.

3.10 Die Langevingleichung für Phononen. (P.Gräff, zusammen mit K.Elsässer⁺)

Wir betrachten einen leicht anharmonischen Kristall. Die früher entwickelte Theorie der schwachen Turbulenz läßt sich sinngemäß auf die quantenmechanische Beschreibung verallgemeinern. U.a. resultiert die kinetische Gleichung von Peierls. Auch die Realisierungsfrage kann gelöst werden.

3.11 Eine exakte 2-Punkt Verteilung für die Burgers Turbulenz. (P.Gräff, H.Tasso, J.Steuerwald)

Die Lösungen der 1-d Burgersgleichung können, durch einen Ansatz von Cole, auf die Lösungen der Wärmeleitungsgleichung zurückgeführt werden. Man kann für die Wärmeleitungsgleichung streng ein Gaußsches Maß annehmen. Daraus und mit Hilfe einiger Reduce Rechnungen kann man die 2-Punkt Verteilung für die Burgersgleichung in geschlossener Form bekommen.

4. Wellen, Mikroinstabilitäten, Elektronenstrahlen

4.1 Mikrowellen Diagnostik eines anisotropen, warmen, inhomogenen Plasmas (R.Saison)

Die Anisotropie-Effekte auf die Frequenzverschiebung in einem Hohlraumresonator (siehe Jahresbericht 1971) wurden für Slab- und Zylindrische Geometrie und willkürliche Dichteprofile untersucht. Diese Arbeit, über die in Grenoble berichtet wurde, wird in "Plasma Physics" veröffentlicht.

4.2 Nicht lokale Behandlung eines inhomogenen eingeschlossenen Plasmas (R.Croci, R. Saison)

Es wurde eine asymptotische Methode im Fourier-Raum entwickelt. Diese erlaubt Wellenlängen zu betrachten, die aber willkürlich im Verhältnis zum Larmor-radius der Teilchen sind. Diese Arbeit wird in "Nuclear Fusion" erscheinen.

⁺MPI für Astrophysik

4.3 Stabilität von dichtemodulierten Plasmaprofilen (R.Croci, R.Saison)

Die Stabilität eines Plasmas in einem Magnetfeld $\vec{B} = \hat{z} B_0$,
mit der Verteilungsfunktion

$$f_{0j} = g(v_{1j}^2, v_{2j}^2) n_0 [1 + 2 \alpha \cos a(x + v_{yj}/\Omega_j)]$$

kann exakt untersucht werden.

Zusätzlich zur "Drift" Mode existiert eine "Modulation" Mode, wenn $\lambda_{\text{Debye}} > R_{\text{i Larmor}}$ ist. Diese Mode, die nicht vom logarithmischen Dichtegradient abhängt, sondern nur von der Modulationsamplitude α , bleibt instabil auch für $|k_y R_{\text{i}}| \ll 1$. Diese Arbeit wird in "Physics Letters" erscheinen.

4.4 Strahleinschuß in ein Plasma (G.Küppers, A.Salat, H.K.Wimmel)

Mittels Einschub in ein Plasma können bekanntlich relativistische Elektronenstrahlen mit überkritischem Strom ($I' > I_A = \text{Alfvénstrom}$) transportiert werden. Für den Einschub eines relativistischen Elektronenstrahls in ein Plasma (mit $n' < n_e$) wurden der Plasma-Rückstrom und die resultierenden Felder berechnet und diskutiert. Mittels linearisierter Momentengleichungen wurde die inertielle (stoßfreie) Phase des Einschusses erstmals für beliebige radiale und axiale Stromprofile des Strahls untersucht. Es wurde gefunden, daß die von anderen Autoren benutzten Kastenprofile das resultierende B_y -Feld im allgemeinen um einen Faktor $r\omega_p/c$ überschätzen ($r =$ radiale Skalenlänge des Stromprofils des Strahls). Radiale Stromprofile mit langsamer Variation über eine Skindicke c/ω_p ergeben dagegen einen Abschirmfaktor des Strahl-B-Feldes der Ordnung $(c/r\omega_p)^2$. Dies kann für Strahldiagnostik und Instabilitäten Bedeutung haben. Da die Gültigkeitsdauer der Rechnung durch die Gyroperiode der Plasmaelektronen beschränkt ist, hat die Alfvén'sche Bedingung für freie Strahl ausbreitung hier keine unmittelbare Bedeutung. Untersucht man sie trotzdem, so ergibt sich a) daß sie für $n' < n_e$ automatisch erfüllt ist, und b) daß sie, im Gegensatz zum Vakuumfall, nicht den Strahlstrom beschränkt. Während der Trägheitsphase sind also beliebige Strahlströme oberhalb des Alfvénstromes möglich.

4.5 Strahl-Plasma-Gleichgewichte (G.Küppers, A.Salat, H.K.Wimmel)

In der Literatur sind bisher nur Gleichgewichte von Elektronenstrahlen im Vakuum mit im Strahlvolumen eingelagerten Ionen theoretisch behandelt. Es schien deshalb theoretisch interessant, auch Strahlgleichgewichte im Plasma zu untersuchen. Derartige Gleichgewichte können z.B. zum Ausgangspunkt theoretischer Stabilitätsuntersuchungen gemacht werden. Der Einfachheit halber wurden Gleichgewichtslösungen isothermer Momentengleichungen unter Berücksichtigung eines Plasmarückstromes in zylindrischer Geometrie berechnet. BENNET-artige Identitäten, die Liniendichten, Ströme, Temperaturen, Geschwindigkeit und Dichteprofil des Strahls verknüpfen, wurden abgeleitet, ebenso wie ein allgemeiner Ausdruck für den magnetischen Abschirmfaktor. Dieser ist groß, wenn die transversale Strahltemperatur klein und das

Dichteprofil des Strahls diffus ist. Unter denselben Bedingungen können überkritische Strahlströme ($I' > I_A$) frei (d.h. mit Strahl-Gyroradius größer als Strahlradius) transportiert werden. Es wurden allgemeine Gleichgewichtslösungen hergeleitet, aber auch spezielle Gleichgewichtstypen angegeben, z.B. elektrisch neutrale Gleichgewichte und quasi-abgeschirmte, quasineutrale Gleichgewichte, sowie Gleichgewichte mit speziellen Profilen. Der Fall eines neutralen Gleichgewichts mit einheitlicher Strahlgeschwindigkeit ($E \equiv 0$, $v' \equiv \text{const}$) führt, ähnlich dem Fall ohne Plasma, zu einer BENNET-artigen Lösung.

5. Simulation

5.1 Eigenschaften von stoßfreien Stoßwellen (D.Biskamp, H.Welter)

Stoßfreie Stoßwellen in magnetisierten Plasmen wurden mit einem numerischen Modell untersucht, das elektromagnetische sowie rein elektrostatische Wechselwirkungen enthält.

a) Ausbreitung senkrecht zum Magnetfeld

Für kurze Beobachtungszeiten $t < \Omega_i^{-1}$, für die die Gyration der Ionen vernachlässigt werden kann, findet man eine im wesentlichen stationäre Stoßwelle. Das Plasma hinter der Stoßfront wird nur adiabatisch komprimiert, während die von den Rankine-Hugoniot Bedingungen geforderte überadiabatische Druckerhöhung von den an der Stoßfront reflektierten Ionen erzeugt wird. Diese werden jedoch erst aufgrund von Gyration thermalisiert. Für lange Zeiten $t > \Omega_i^{-1}$ zeigt die Stoßfront ein instationäres Verhalten.

b) Ausbreitung schräg zum Magnetfeld

Im Gegensatz zum Fall senkrechter Ausbreitung findet hier eine starke, im wesentlichen elektrostatische Wechselwirkung der reflektierten Ionen mit dem Whistlervorläufer statt, die zu einer raschen Thermalisierung führt. Gyration spielt dabei keine wesentliche Rolle.

5.2 Anomaler elektrischer Widerstand (D.Biskamp, R.Chodura)

Die 1971 begonnenen numerischen Untersuchungen über anomalen Widerstand wurden im wesentlichen abgeschlossen.

a) Asymptotisches Verhalten von eindimensionalen Plasmen

Das numerische Ergebnis $v_e = v_d$ entspricht dem Fall maximaler Dissipation bei gegebenem äußeren Feld E_0 . Es steht im krassen Widerspruch zum Ergebnis der quasi-linearen Theorie und kann am besten durch eine Folge von instabilen BGK-Gleichgewichten beschrieben werden. Neben der Randbedingung $E_0 = \text{const}$ wurden auch bei Bedingung konstanten Stromes $j_0 = \text{const}$ und $j_0 + \dot{E}_0 = \text{const}$ untersucht. In beiden Fällen schaltet sich der Widerstand bei $v_d = 2/3 v_e$ aus.

b) Anomaler Widerstand im Fall Strom senkrecht Magnetfeld

(Hoch- β Konfiguration). Die im Vorjahr aufgetretene Kontroverse über das Verhalten der Instabilität in diesem Fall wurde geklärt. Für ein eindimensionales Turbulenzspektrum entwickelt sich eine sehr wirkungsvolle nichtlineare Instabilität, bei der die Heizraten stark vom Magnetfeld abhängen. Die Instabilitätsgrenzen sind jedoch ähnlich denen der nichtmagnetischen Zweistrominstabilität, d.h., es gibt keinen anomalen Widerstand für $v_d < v_e$, $T_e < T_i$. Dies gilt erst recht für den allgemeinen Fall eines breiten (mehrdimensionalen) Spektrums. Hier findet man ein der Ionenschallinstabilität sehr ähnliches Verhalten. Die wesentliche Wirkung

des Magnetfeldes besteht darin, Elektronen runaway zu verhindern.

c) Anomaler Widerstand im Fall Strom parallel Magnetfeld

(Niedrig- β Konfiguration). Hier wurde vor allem die Frage untersucht, ob hochfrequente Elektronenzyklotron Instabilitäten auftreten und in welchem Maße sie eine Verzerrung der Elektronenverteilung und damit runaway verhindern. Keine effektive Instabilität dieser Art wurde in den Simulationen gefunden, das Plasma verhält sich für lange Zeiten, vor allem wenn $\Omega_e/\omega_{pe} > 1$, praktisch eindimensional. Dies steht im Widerspruch zu einer Reihe von Experimenten über turbulente Heizung.

Der stoßdominierte Widerstand für $E_0 < E_{Dreicer}$ wurde auch untersucht. Wir finden im wesentlichen den klassischen Widerstand und keine anomale Erhöhung, wie sie am C-Stellarator im Bereich $v_d > c_s$ beobachtet wurde.

5.3 Entwicklung eines Teilchencodes zur Beschreibung von toroidalen Plasmen
D.Biskamp, H. Welter, K.U.v.Hagenow

Zur Simulation von fast stoßfreien toroidalen Plasmen wird ein Teilchenprogramm entwickelt. Die erste Stufe beschränkt sich auf axial symmetrische (zweidimensionale) Konfigurationen mit vorgegebenem Magnetfeld. Die Wirkung von Coulombstößen wird explizit und regelbar in das Modell eingebaut. In einer späteren Stufe sollen auch selbstkonsistente Magnetfeldänderungen erlaubt sein und das Modell auf drei Dimensionen erweitert werden.

5.4 Übersichtsbericht über stoßfreie Stoßwellen (D.Biskamp)

Es wurde ein Übersichtsartikel über Entwicklungen auf dem Gebiet der stoßfreien Stoßwellen für die Zeitschrift Nuclear Fusion verfasst. Theoretische Arbeiten werden mit Ergebnissen von numerischen Rechnungen und Experimenten verglichen. Die Betonung liegt vor allem auf einer kritischen Beurteilung der bisherigen Vorstellungen von den stoßfreien Dissipationsprozessen.

6. Spezielle mathematische Probleme

6.1 Differenzenschemata für hyperbolische Systeme (W.Höhn)

Allgemein für hyperbolische Systeme, insbesondere aber auch für den Fall einer nicht diagonalisierbaren charakteristischen Matrix wird die Konvergenz einiger 3-level Differenzenschemata mittels eines Äquivalenzsatzes und Betrachtungen über schwache Stabilität bewiesen.

6.2 Nicht-lineare elliptische Randwertprobleme (R.Meyer-Spasche)

Es wurde mit der Untersuchung von Randwertproblemen des Typs

$$(*) \quad \Delta u = f(\vec{x}, u) \text{ in } G, \quad u = 0 \text{ auf } \partial G$$

begonnen. Dabei ist f eine nicht-lineare Funktion, die zuläßt, daß $(*)$ mehrere Lösungen hat. Es sollen sowohl Kriterien für die Anzahl von Lösungen entwickelt werden als auch numerische Verfahren, die sämtliche

Lösungen liefern.

6.3 Eigenwertschranken für die Hill'sche Gleichung (D.Lortz, E.Rebhan)

Die Abschätzung unterer Schranken für den niedrigsten Eigenwert des Hill'schen Randwertproblems führt auf ein gewisses Variationsproblem (Jahresbericht 71). Die Beweise für die Lösung dieses Variationsproblems wurden vervollständigt. Die Arbeit wird in ZAMM (1973) veröffentlicht.

7. Programmentwicklung und Erprobung

7.1 Mathieu'sche Differentialgleichung (H.Pillsticker)

Im Berichtsjahr wurde ein Unterprogramm in FORTRAN und ALGOL zur Berechnung des charakteristischen Wertes a (a_r oder b_r) der Mathieuschen Differentialgleichung

$$\frac{d^2 y}{dv^2} + (a - 2q \cos 2v) y = 0$$

entwickelt.

$a = a_r$ gehört zu geraden periodischen Lösungen,

$a = b_r$ gehört zu ungeraden periodischen Lösungen.

Zwischen dem Eigenwert a und dem Parameter q existieren 4 verschiedene Typen von Gleichungen mit Kettenbrüchen (Siehe Meixner, Schäfke: Mathieusche Funktionen und Sphäroidfunktionen, Springer 1954, S.118), aus denen bei vorgegebenen beliebigen positiven oder negativen q und gegebenem Index r mit Hilfe der Regula falsi Methode der gewünschte Eigenwert a_r oder b_r ausgerechnet wird. Dieses Unterprogramm arbeitet zuverlässig und schnell.

Neben einigen anderen allgemein verwendbaren Unterprogrammen, wie Kanonische Zerlegung einer ganzen Zahl $ABS(N)$ in Primfaktoren, Berechnung von $\Gamma(x)$ für negative x usw., wäre eine Subroutine zu erwähnen, die für n gegebene Funktionswerte (x_j, y_j) nach der Methode der kleinsten Quadrate eine Ausgleichsfunktion

$$\hat{y}(x) = a_1 \eta_1(x) + \dots + a_k \eta_k(x) \text{ durch eine Linearkombination}$$

von k vorgegebenen linear unabhängigen Funktionen η_i bestimmt.

Errechnet werden die Koeffizienten a_i , $i=1, \dots, k$, die ausgeglichenen Funktionswerte $\hat{y}(x_j)$, $j = 1, \dots, n$ und die Fehlerquadratsumme.

7.2 Eindimensionales Lagrange-Schema für Laser-Kompressionsrechnung (K.Lackner, L.Lengyel⁺)

Ein eindimensionales Lagrange Programm zur Berechnung von Laserkompression wurde entwickelt. Das Programm entspricht in der physikalischen Aufgabenstellung dem bekannten WAZER-code (Lawrence Radiation Laboratory - Livermore), unterscheidet sich von ihm jedoch in der Numerik; vor allem durch die Behandlung der Nichtlinearitäten mit der Methode von Düchs.

⁺Abt.4

7.3 Poisson - Solver. (K.U.v.Hagenow)

Die bereits bestehenden Programme werden erweitert um:

- a) Ein Programm zur Lösung der Poisson-Gleichung im Torus, r - z Koordinaten, feste Randbedingungen.
- b) Ein Programm zur Bestimmung des Vektorpotentials im Torus, r - z Koordinaten, feste Randbedingungen.

Damit stehen zur Verfügung:

Programm	Problem	Geometrie	Rand
XYPOIS	Poisson	2D, eben	fest
POIS23	Poisson	2D, 3D, eben	periodisch
POISTR	Poisson	Torus, r-z	fest
E Q U	Vektorpotential	Torus, r-z	fest

Alle Programme sind in PL 360 geschrieben; sie lösen das entsprechende lineare Gleichungssystem direkt ohne Iteration und sind als FORTRAN Subroutinen verwendbar.

7.4 Programmgenerator (D.Düchs, W.Schneider⁺)

Für Systeme räumlich eindimensionaler, gekoppelter, nichtlinearer, partieller Differentialgleichungen mit Termen von einschließlich zweiter Ordnung werden allgemeine Differenzenschemata entwickelt. Es hat sich als wichtig erwiesen, von einer integrierten Form der Gleichungen auszugehen und die Annahmen über den Verlauf der Funktionen zwischen den Stützpunkten konsequent zu verwenden. Im allgemeinen ergibt sich dann ein kompliziertes algebraisches Gleichungssystem, das jedoch nach verhältnismäßig einfachen Regeln konstruiert und gelöst werden kann. Dafür wurde ein Programmgenerator entwickelt, der für vorgegebene Differentialgleichungen ein Fortranprogramm liefert. Der Generator ist zur Zeit verwendbar für Gleichungssysteme, die keine Produkte von Ableitungen enthalten.

7.5 Erfahrungen mit REDUCE2 im Zusammenhang mit MHD-Stabilitäts-Rechnungen (J.Steuerwald, W.Kerner, H.Tasso)

Die "garbage collection" von LISP sammelt im Laufe der Rechnung die befreiten Zellen und erstellt eine Liste von "free words". Damit sich die Aufgabe des "garbage collectors" rentiert, müssen die Programme so gestaltet werden, (z.B. mit Hilfe von Schleifen) daß genügend "garbages" produziert wird. Sonst sollte die Größe der Ausdrücke so begrenzt werden, daß die zeitraubende "garbage collection" nicht wiederholt vorkommt. Dadurch ist ein beachtlicher Rückgang in der Rechenzeit erzielt worden.

⁺ Abt. 1

Der Reduce Befehl "OFF MCD" (off make common denominator) vermeidet zu große Integer Zahlen. Dies erlaubt, Entwicklungen zu höheren Ordnungen durchzuführen, ist jedoch mit einer Verlängerung der Rechenzeit um den Faktor 2 bis 3 verbunden.

8. Ausbildung von Programmierern

8.1 Ausbildung von Programmierern (K.Graf Finckenstein, O.Eder, R.Meyer-Spasche)

Von April bis September 1972 wurden Wiederholungskurse in Mathematik abgehalten. Die Kursteilnehmer werden Anfang 1973 die Prüfung zum Mathematisch Technischen Assistenten vor der Industrie- und Handelskammer Ludwigshafen ablegen.

Im Berichtsjahr legten 4 Programmierer der Abteilung die Prüfung ab und bestanden sie.

9. Dokumentation, Bibliothek

9.1 Dokumentation (K.U.v.Hagenow)

Im Berichtsjahr wurden klassifiziert:

Plasma Physics Index:	5.824 Titel
Vacuum and Surface Index:	2.485 Titel
Technology Index:	3.037 Titel

Der Gesamtbestand an klassifizierten Veröffentlichungen und Reports betrug am 31.12.1972:

Plasma Physics Index	32.401 Titel
Vacuum and Surface Index	13.845 Titel
Technology Index	12.445 Titel

Alle bisher erfassten Titel sind einer maschinellen Recherche zugänglich. Ab Mitte 1972 wird von der Dokumentation monatlich eine Titelliste erstellt, die die im Plasma Physics Index erfassten Titel aus den wichtigsten Zeitschriften enthält.

9.2 Bibliographie toroidaler Einschließung bei kleinem Beta (B.J.Green)

Die Tokamak-Bibliographie wurde auf den neuesten Stand gebracht und durch Einbeziehung der Stellarator-Literatur erweitert. Da der größte Teil dieser Literatur nicht auf dem Plasma Physics Index-Band ist und deshalb zuerst klassifiziert und auf Band geschrieben werden muß, ging die Arbeit langsam voran. Wir hoffen jedoch 1973 den größten Teil der Literatur vor 1967 sammeln zu können und einen neuen Bericht herauszugeben.

9.3 Tätigkeitsbericht der Bibliothek des IPP 1972 (L.Johannsen)

In der Abwicklung des Erwerbs und der Katalogisierung der neuen Bücher, Zeitschriften und Reports hat sich gegenüber dem Vorjahr nichts Wesentliches geändert.

Geändert haben sich die Ausleihbedingungen für Reports: erste Woche Ausleihsperrung, dann Leihfrist von zwei bzw. einer Woche (letzteres für besonders gefragte Reports). Neu hinzu kam die Reportreihe C = Computer. Die Menge der durch Austauschabkommen erhaltenen Reports ging weiter zurück, so daß mehr als 90 % der in unsere Sammlung aufgenommenen Reports aus gezielten Bestellungen der Bibliothek stammen.

Durch Verschicken und Auswerten von Fragebogen an die 709 ständigen Bezieher der IPP-Laborberichte, Sonderdrucke, Vierteljahreslisten und Jahresberichte wurden die Änderungen der Adressen, der Interessen und der Gegengaben festgestellt.

Seit August wird monatlich eine Liste der von der Dokumentation klassifizierten Artikel aus den wichtigsten Zeitschriften ausgedruckt und an die Wissenschaftler verteilt.

Im Berichtsjahr wurden 73 zur Veröffentlichung bestimmte Manuskripte an die Verlage eingereicht, der sich daraus ergebende Schriftwechsel geführt, die betreffenden Sonderdrucke bestellt und im Institut und nach auswärts verteilt.

Dem Bibliotheksausschuß wurden monatlich von der Bibliothek zusammengestellte Konferenzlisten zur Auswertung vorgelegt.

Auch im Jahr 1972 wurden Quarterly Title Lists of Reports etc. und eine alphabetisch geordnete Jahresliste von der Bibliothek erstellt und verschickt.

An die Wissenschaftler des IPP wurden im Berichtsjahr verteilt:

360 Vortragsankündigungen
 20 Büchererwerbslisten
 43 Reporterwerbslisten
 114 neue IPP-Sonderdrucke
 69 neue IPP-Laborberichte

Gesamtbestand am 31.12.1972:

16.735 Bücher
 7.943 gebundene Zeitschriften
 20.501 Reports
 508 laufende Zeitschriften-Abonnements
 (in 9 Handbibliotheken und der Hauptbibliothek).

Die Bemühungen des zuständigen Gremiums zur Erstellung eines Schlagwortkataloges führten zu keinem Erfolg und wurden eingestellt.

INFORMATIK (Dr. F. Hertweck)

(U. Berkl, J. Cox, M.G. Croci, A. Döderlein, E. Fisser, H. Fisser, K.H. Goihl, W. Hüngsberg, R. Pocock, I. Precht, J. Schneider, D. Seewald, W. Sendler)

I. Betrieb der IBM 360/91Übersicht

Während des Jahres 1972 wurde die Maschine mit 4 Schichten fast voll ausgelastet. Lediglich in den Nächten von Sonntag auf Montag und während der Weihnachtsfeiertage / Jahreswechsel wurde die Maschine nicht eingeschaltet. Eine Übersicht über die Betriebszeiten, Wartungszeiten, CPU-Zeiten usw. gibt die folgende Tabelle:

Tabelle 1 Betriebsstatistik 1972

Betriebszeit	7350:02	
Laufzeit (Jobs in der Maschine)		6994:25
Wartezeit (keine Jobs in der Maschine)		81:58
Verlorene Zeit (Software, Hardware)		273:39
Wartungszeit	629:55	
Betriebssystem (Dump/Restore, usw.)		69:42
Hardware		543:33
Hilfsaggregate (Klima, Generatoren, usw.)		16:40
Kein Rechenbedarf	128:00	
Maschine abgeschaltet	496:00	
Systemverfügbarkeit (BZ-VZ)/BZ	96	
Zusätzliche OS-Starts/Werktag	2.9	
<hr/>		
Anzahl der Jobs	270681	
Verlorene Jobs (durch Warmstarts, usw.)	2402	
<hr/>		
CPU-Zeit	5231:43	
CPU-Ausnutzung	74.8 %	

Erklärung der Begriffe:

- Betriebszeit = Zeit zwischen Übergabe durch Wartungstechniker an Operateure bis Betriebsende (Übergabe an Techniker oder Abschalten)
- Laufzeit = Zeit in der mindestens ein Job im Arbeitsspeicher ist
- Wartezeit = Zeit, in der (vorübergehend) keine Jobs vorliegen
- Verlorene Zeit = alle durch Warmstarts, Hardwarefehler (Maschine und Hilfsaggregate), Bedienungsfehler und Reparaturen verlorene Zeiten während der Betriebszeit
- Betriebszeit = Laufzeit + Wartezeit + Verlorene Zeit
- Wartungszeit = Zeiten, in denen (geplant) Wartungsarbeiten durchgeführt werden (Maschinen, Hilfsaggregate, Dump/Restore usw.)
- Maschine abgeschaltet = Zeiten, in denen (geplant) die Maschine abgeschaltet wird (Betriebsferien, kein Personal)
- Kalenderzeit = Betriebszeit + Wartungszeit + kein Rechenbedarf + Masch. abgeschaltet
- Systemverfügbarkeit = (Betriebszeit - Verlorene Zeit)/Betriebszeit

Zusätzl. OS-Starts/ Werktag	= Alle an Werktagen (normale Arbeitstage mit vollem Rechenbetrieb), zusätzl. durchgeführten OS-Starts dividiert durch die Anzahl der Werktage in einem Monat
CPU-Zeit	= Die durch das Job-Account ausgewiesene Zeit, in der die CPU beschäftigt war (Laufzeit = CPU-Zeit + CPU-Wartezeit)
CPU-Ausnutzung	= CPU-Zeit/Laufzeit

Der Rechenzeitverbrauch, aufgeschlüsselt nach Projekten des IPP, ist aus Tabelle 2 ersichtlich:

Tabelle 2 Anteil der IPP-Projekte an der Rechenzeit

INSTITUT-KOSTENSTELLE-KOSTENTRÄGER	RECHENZEIT	ANTEIL
IPP NA Entwicklung num. Verfahren	20.13.57,71	0.4 %
IPP NB Numerische Plasmadynamik	379.08.41,62	7.2 %
IPP NC Reine Theorie	5.26.48,52	0.1 %
IPP NO Theorie/Allgemein	4.12.13,11	0.1 %
IPP N3 Dokumentation	7.47.32,36	0.1 %
IPP N4 Programmierungsgruppe	20.58.02,65	0.4 %
IPP RA EDV / AMOS - Entwicklung	3.05.43,10	0.1 %
IPP PO RECHENANLAGE	84.40.37,96	1.6 %
IPP SB Berechnungen	29.19.02,70	0.6 %
IPP SL Planüberwachung	1.49.28,76	0.0 %
IPP TB Laserentwicklung	0.06.13,00	0.0 %
IPP TO Technik / Allgemein	14.32.08,71	0.3 %
IPP T1 Projektierung	0.09.04,84	0.0 %
IPP T5 Magnetfeldtechnik	0.02.06,68	0.0 %
IPP T9 Laser	0.31.24,94	0.0 %
IPP V2 Verwaltung u. übrige Allgemeine Dienste	34.14.20,19	0.7 %
IPP OA Relativistischer Plasmaring/Smokatron	42.35.31,07	0.8 %
IPP 1A ISAR I	3.07.20,24	0.1 %
IPP 1D BELT-PINCH 1	0.04.32,71	0.0 %
IPP 1E Turbulenzheizung	1.05.47,79	0.0 %
IPP 1F Spinne	8.40.29,63	0.2 %
IPP 1S Plasmasimulation	1003.48.21,86	19.2 %
IPP 1T Theorie	79.04.15,04	1.5 %
IPP 1o Experimentelle Plasmaphysik 1/Allgemein	123.17.48,45	2.4 %
IPP 13 Auswerte-Gruppe	1.12.03,62	0.0 %
IPP 2A Stellarator W VII	0.00.01,15	0.0 %
IPP 2H Stellarator W IIA	1.03.54,53	0.0 %
IPP 2K Multipol W VI	20.05.24,40	0.4 %
IPP 2P Mikrowellen	0.26.41,91	0.0 %
IPP 2R Wendelstein VII Stellarator	1.24.39,69	0.0 %
IPP 2T Optik	0.00.09,71	0.0 %
IPP 2W Stellarator W IIB	0.33.26,23	0.0 %
IPP 2Z Theorie	54.16.41,29	1.0 %
IPP 2o Experimentelle Plasmaphysik 2/Allgemein	24.48.41,83	0.5 %
IPP 3P Pulsator 1	5.32.56,22	0.1 %
IPP 3o Experimentelle Plasmaphysik 3/Allgemein	27.58.14,98	0.5 %
IPP 4A Dichte Laserplasmen	0.26.50,69	0.0 %
IPP 4L Caesar Kl. MHD-Generatoren	0.18.40,32	0.0 %
IPP 4O	0.00.55,14	0.0 %
IPP 4P MHD Theorie	2.15.06,24	0.0 %
IPP 4R Stosswellen	13.07.02,49	0.3 %
IPP 4S Laserplasma	32.04.25,99	0.6 %
IPP 4M GEMA Geschl. MHD-Generator	0.27.07,97	0.0 %
IPP 4T Plasmawellen	0.41.01,26	0.0 %
IPP 4V Ultrarot-u.Submillimeter-Laser	0.03.33,70	0.0 %
IPP 4W Chemische Laser	0.48.11,28	0.0 %
IPP 4X Stochastische Heizung	16.43.12,40	0.3 %
IPP 4Y Verbrennungs-MHD-Generator	5.26.17,92	0.1 %
IPP 4o Exp.Plasm.Phys.4/Allgemein	1.31.38,26	0.0 %
IPP 9N Pharo	9.09.04,71	0.2 %
IPP 9P Bombardon	0.32.57,29	0.0 %
IPP 9Q Sorbas	0.02.17,92	0.0 %
IPP 9R Mikrostrahlsonde	0.55.45,01	0.0 %
IPP 9S ESCA	1.10.35,09	0.0 %
IPP 9U Plasma-Wand-W	0.00.00,77	0.0 %
IPP 9W Polaris-Leed	0.25.33,30	0.0 %
	<u>2091.34.46,95</u>	<u>40.0 %</u>
	=====	=====

Tabelle 3 liefert eine Übersicht über den Rechenzeitverbrauch und die Anzahl der gerechneten Jobs für alle die Rechenanlage des IPP benutzenden Institutionen.

Tabelle 3 Rechenzeiten und Job-Anzahlen für alle Benutzer-Institutionen

Benutzung der IPP-Rechenanlage im Jahre 1972 durch folgende Institute	Rechenzeit	Anteil	Jobanzahl	Anteil
IPP MPI f. Plasmaphysik, Garching	2091:13'42"	39.95%	90214	33.52%
MAE MPI f. Ionosphärenphysik, Lindau/Harz	22: 2'55"	0.42%	369	0.14%
MEL MPI f. Eiweiss- u. Lederforschung, München	154:40'32"	2.96%	26096	9.70%
MFK MPI f. Festkörperforschung, Stuttgart	8: 6'41"	0.15%	1772	0.66%
MFV MPI f. Verhaltensphysiologie, Andechs	1:55' 0"	0.04%	193	0.07%
MPA MPI f. Astrophysik, München	1437: 0'42"	27.46%	33204	12.34%
MPC MPI f. Chemie, Mainz	3: 6' 6"	0.06%	310	0.12%
MPE MPI f. Extraterr. Physik, Garching	263: 7'43"	5.03%	18892	7.02%
MPP MPI f. Physik, München	847:25'20"	16.19%	33327	12.38%
MPS MPI f. Psychiatrie, Abt. Dokumentation, München	24:19' 0"	0.46%	6607	2.46%
MSF MPI f. Strömungsforschung, Göttingen	10:53'26"	0.21%	79	0.03%
AAM Arbeitsgem. f. Ausb. Forsch. i. d. Medizin, München	0:31' 9"	0.01%	319	0.12%
IFO Inst. f. Wirtschaftsforschung, München	5:34' 0"	0.11%	2738	1.02%
LHM Stadtentw. Referat Landeshauptst. München	2:10'18"	0.04%	1055	0.39%
SBP Staatsinstitut f. Bildungsplanung, München	2:56'33"	0.06%	1318	0.49%
THM Technische Universität München	101: 4'19"	1.93%	15968	5.93%
THP Physikdepartment d. Techn. Univers. München	101:31'17"	1.94%	16217	6.03%
UMU Universität München	103:31'56"	1.98%	16496	6.13%
UNA Universität Augsburg	3:25' 2"	0.07%	1601	0.59%
VLI Inst. Max von Laue / Paul Langevin, Garching	5:49'19"	0.11%	1218	0.45%
WIS Kommission f. Tieftemperaturforschung, Garching	2:17'43"	0.04%	662	0.25%
APH Inst. f. angewandte Physik, Heidelberg	0: 8'32"	0.00%	13	0.00%
DFV DFV f. Luft- u. Raumfahrt, Oberpfaffenhofen	0:32' 2"	0.01%	85	0.03%
GST Ges. f. Strahlenforschung, Neuherberg	0: 0' 8"	0.00%	4	0.00%
IKF Inst. f. Kernphysik, Frankfurt	0: 2'24"	0.00%	16	0.01%
KFK Kernforschung, Karlsruhe	36: 9'18"	0.69%	81	0.03%
MFH Fritz-Haber-Institut der MPG, Berlin	3:34' 3"	0.07%	114	0.04%
URE Universität Regensburg, Regensburg	0: 0'25"	0.00%	6	0.00%
DJI Deutsches Jugendinstitut, München	0:47'39"	0.02%	39	0.01%
ITP Universität Innsbruck, Innsbruck	0: 2'33"	0.00%	14	0.01%
SYS Task + Jobfail	0: 0' 0"	0.0 %	77	0.03%
Summe aller Institute:	5233:59'47"	100.00%	269104	100.00%

Erweiterungen der Hardware

In der ersten Jahreshälfte wurden 30 SIEMENS Transdata 8151 Terminals installiert, die die bisher benutzten IBM 2260 abgelöst haben. Gleichzeitig wurden die Datenfernübertragungssteuereinheiten IBM 2702 und IBM 2701 durch eine IBM 2703 ersetzt, an die auch die SIEMENS Terminals angeschlossen wurden. Auf dem Gelände des IPP wurde ein Kabelnetz zur Datenfernübertragung zwischen beliebigen Terminals oder Prozeßrechnern und der zentralen Rechenanlage eingerichtet. Die für den Anschluß von Prozeßrechnern an die /91 vorgesehene PDP11 wurde durch eine INTERDATA Modell 70 (bzw. 50) ersetzt, da dieser Rechner für Datenfernübertragungsaufgaben besondere Befehle besitzt. Die PDP11 wurde an eine Experimentelle Abteilung des Instituts abgegeben. Anfang des Jahres wurde ein CALCOMP 1670 Microfilm-Plotter in Betrieb genommen. Er hat eine 16 mm Kinofilmkamera und eine 105 mm Microfichekamera. Ein Filmentwicklungslabor zur automatischen Entwicklung des Microfilm-Plotteroutputs wurde ebenfalls eingerichtet. Im Dezember wurden vier neue Bändeinheiten IBM 3420/VII und eine Bandsteuereinheit IBM 3803 zusätzlich an die /91 angeschlossen.

Betriebssystem OS/360-MVT

Seit 1970 wird die Version 18 des Betriebssystems benutzt. Durch verschiedene vom Hersteller gelieferte Änderungen konnte die Zuverlässigkeit des Systems bedeutend verbessert werden. Herr Köpfer (IBM) hat eine neue Version des Konsolsteuerprogramms PEEP implementiert. Der Operator erhält dadurch eine bessere Übersicht über das System und flexiblere Eingriffsmöglichkeiten. Seitens der Systemgruppe wurden keine wesentlichen Änderungen durchgeführt. Lediglich für die Anschlüsse der SIEMENS Bildschirme, der Bändeinheiten und des Microfilm-Plotters wurden die notwendigen Kontrollblöcke generiert.

Die Registrierung von Job-Account-Parametern wurde verbessert, sodaß eine Statistik über die verwendeten Programme erhältlich ist. Es wurde ein Dienstprogramm geschrieben, welches das Ausstanzen von Lochkarten erleichtert. Die IPP Dump- und Program-Check-Routinen wurden verbessert.

Im Laufe des Jahres wurde versuchsweise das APL System der York University (Toronto/Canada) installiert. Bis auf geringfügige Abweichungen ist das York APL äquivalent mit dem IBM-APL, es benötigt jedoch weit weniger Speicherplatz. Nach einigen anfänglichen Schwierigkeiten lief das System zufriedenstellend. Ein Dienstprogramm zum Kopieren des Inhaltes des Plattenspeichers auf Magnetbänder erhöht die Sicherheit des Systems bedeutend. Einige Fehler im System wurden gefunden und behoben.

AMOS-Betrieb

Das AMOS-System wurde Mitte 1971 in Betrieb genommen. Von Anfang an war es sehr stabil. Systemzusammenbrüche kommen so gut wie gar nicht vor und auch Verluste von Dateien oder Teilen davon sind äußerst selten. In diesem Abschnitt wird mehr über den laufenden Betrieb des AMOS berichtet, während Weiterentwicklungen unter II.beschrieben sind. Anfang des Jahres gab es etwa 100 AMOS-Benutzer, die 250 Dateien generiert hatten. Diese Dateien befanden sich auf zwei Plattenstapeln und einer Magnetstreifenzone. Im Laufe des Jahres stieg die Anzahl der Benutzer auf 300, die Anzahl der Files auf 850, wobei drei Plattenstapel und sechs Zellen benutzt werden. Die Möglichkeiten der Operator-AMOS-Kommunikation wurden verbessert, so daß der Operator mehr Möglichkeiten zur Steuerung des Systems erhielt. Es wurden Konversionsroutinen geschrieben, um OS/360 Dateien in AMOS-Dateien zu konvertieren. Während einer Performance-Studie wurden Daten gesammelt, die einen detaillierten Einblick in den Lauf des Systems gestatten. Es zeigte sich, daß die Design-Parameter des Systems im wesentlichen richtig gewählt waren. Ein Teil der Wartungsarbeiten umfaßte die Entwicklung von Programmen, um den Katalog oder die Directories der Dateien im Falle von Systemstörungen zu rekonstruieren.

Bis Mitte des Jahres wurden alle SIEMENS Bildschirme angeschlossen, wozu einige Änderungen am AMOS-System notwendig waren. Der Hauptgrund hierfür ist die andere Anschlußtechnik dieser Terminals, die in Vierergruppen über eine Telefonleitung mit 4,8 Kbaud betrieben werden. Zwar ist die Datenübertragung damit langsamer, doch können (insbesondere mit Postmietleitungen) beliebige Entfernungen überbrückt werden. Es war damit möglich, auch im MPI für Physik und Astrophysik, Freimann, eine Gruppe von Terminals zu installieren. Damit haben alle wesentlichen Benutzergruppen Zugang zum AMOS-System. Gegen Ende des Jahres werden 3/4 aller Jobs über AMOS eingegeben.

Benutzerberatung

Die Beratung der Benutzer wurde intensiviert. Es steht ganztägig ein Systemprogrammierer zur Verfügung. Ein weiterer Ausbau des Beratungsdienstes wäre wünschenswert, scheitert jedoch an

Personalmangel. Trotzdem gelang es, einige Kapitel des IPP-Benutzerhandbuchs neu aufzulegen und das Rechenanlagen-Pulletin BITS & BYTES seit Oktober 1972 regelmäßig jeden Monat erscheinen zu lassen.

II. AMOS Entwicklung

SIEMENS Transdata 8151-Anschluß

Anfang des Jahres wurden 30 SIEMENS Transdata 8151 Terminals über eine IBM 2703 Steuereinheit an die /91 angeschlossen. Sie ersetzen die bisher installierten IBM 2260 Bildschirmterminals. Auch bei den SIEMENS Terminals handelt es sich um Bildschirme, die jedoch über normale Telefonleitungen angeschlossen werden können. Allerdings ist die Datenübertragungsgeschwindigkeit erheblich langsamer (4800 Baud). Sie haben ein gutes PreisLeistungsverhältnis bei ausgezeichneter Bildqualität und eignen sich besonders zum Anschluß über sehr lange Leitungen. Es wurde damit möglich, AMOS-Terminals auch in anderen Gebäuden des IPP sowie anderen Max-Planck-Instituten aufzustellen. Wegen der verglichen mit den IBM Terminals langsamen Datenübertragung mußte der Eingabe-/Ausgabe-Modul des AMOS völlig neu konzipiert werden. Der Modul TELCOM organisiert die zu den AMOS-Transaktionen asynchronen Eingabe-/Ausgabe-Operationen. Ab Mai laufen die Terminals zufriedenstellend.

Plot-Spooling-System. Für die graphische Ausgabe sind vier Increment-Plotter über ein selbstgebautes Interface an eine IBM 2701 Steuereinheit angeschlossen. Diese Konstruktion ist besonders billig, da die vier Plotter parallel betrieben werden können und nur eine Steuereinheit erfordern. Das Problem dabei ist, daß das Betriebssystem OS/360 nicht in der Lage ist, vier Datenströme über eine Steuereinheit auszugeben. Für den Betrieb der Plotter wurde deshalb ein Spezialprogramm verwendet. Dieses Programm hat die Spool-Data-Sets des OS im Batch verarbeitet, was zu relativ langen Turn-around-Zeiten führte. Ein auf der Basis von AMOS entwickeltes Spooling-System behebt diese Schwierigkeiten. Zu diesem Zweck wurde ein zweites AMOS-System generiert, welches nur die für das Spooling notwendigen Task Management Module enthält. (Der Weg, ein zweites AMOS-System zu generieren, wurde aus Sicherheitsgründen eingeschlagen.) Die Plot-Routinen z.B. eines FORTRAN-Programms, übergeben ihre Daten diesem zweiten AMOS-System, welches die Weiterverarbeitung organisiert. Dieses System benötigt weniger Speicherplatz, hat kürzere Turn-around-Zeiten und ist betriebssicherer.

AMOS Eingabe/Ausgabe für FORTRAN, ALGOLW und PL360. Um dem Benutzer zu ermöglichen, von Programmen aus auf AMOS-Dateien zuzugreifen, wurde AMOS um einen Eingabe/Ausgabe-Modul erweitert, der asynchron Aufträge von Programmen verarbeiten kann. Da im Prinzip mehrere Programme sowie Benutzer von Terminals aus auf solche Dateien zugreifen könnten, muß die gegenseitige Ausschließung sichergestellt sein. Auch dies ist eine Aufgabe dieses Moduls. Die Benutzerprogramme können dabei unverändert bleiben, lediglich auf der Job-Steuerkarte muß angemerkt werden, daß es sich bei einer Datei um eine AMOS-Datei handelt.

Residenter AMOS Reader. Um die Übergabe von Jobs vom AMOS System an das OS/360 zu beschleunigen, wurde ein OS/Reader so modifiziert, daß er AMOS-Dateien direkt verarbeiten kann. Gegenüber dem bisher benutzten transienten OS/Reader hat das zwei Vorteile: Erstens treten keine Wartezeiten für die Beschaffung von Kernspeicher für den Reader auf. (Die Benutzung des residenten Readers ist nur möglich, weil das AMOS die Warteschlangenbildung der Job-Aufträge übernimmt.) Zweitens entfällt der bisher notwendige Umkopiervorgang von AMOS-Dateien in OS-kompatible Dateien. Die Implementierung dieses Readers hat den Durchsatz des Systems merklich erhöht.

Transiente AMOS-Routinen. Da das AMOS-System von einer großen Zahl von Benutzern ständig

benutzt wird, wurde es immer schwieriger, Systemänderungen während des Tages zu testen. Deshalb wurde ein Modul eingebaut, der es gestattet, vorher kompilierte Routinen während des laufenden Betriebs vom Plattenspeicher in besondere Kernspeicherbereiche zu laden. Diese Routinen können dann unmittelbar benutzt werden. Auf diese Weise ist ein störungsfreier Testbetrieb auch während der Tageszeit möglich. Tritt während der Ausführung eines AMOS-Kommandos eine Programmfehlerunterbrechung auf, so wird nur die diesem Terminal zugeordnete AMOS-Task abgebrochen. Das Terminal ist damit "tot", wird aber nach höchstens 10 Minuten automatisch wieder gestartet.

III. Programmier-Sprachen

Der von STANFORD gelieferte neue ALGOL-W Compiler, der umfangreiche Testmöglichkeiten enthält und die separate Kompilation von Unterprogrammen gestattet, wurde in Betrieb genommen. Vorarbeiten für den Anschluß der IPP-ALGOLW Runtime Routinen wurden durchgeführt.

Mit den Compiler Generator Systemen XPL und LALR wurden Studien durchgeführt mit der Absicht, die Übersetzerphase des PL360 Compilers zu ersetzen. Diese Arbeiten verliefen erfolgreich und so wurde der PL360 Compiler auf einen XPL-generierten Syntax Checker umgestellt. Es war auf diese Weise möglich, verschiedene, für die AMOS Entwicklung wünschenswerte neue Sprachelemente in PL360 einzubauen. Auch einige schon existierende, von Hand "eingeflickte" Änderungen konnten mit Hilfe des XPL Systems in die Syntax von PL360 eingebaut werden.

Der PPL Compiler, der auf einer IBM 360 läuft und Programme für die DEC PDP11 übersetzt, wurde weiter ausgetestet. Insbesondere handelte es sich um Goto Statements, Blocks und Prozeduren.

IV. Weitere Projekte

In diesem Abschnitt werden Projekte angeführt, für die der Arbeitsaufwand einige Mann-Monate nicht überschritten hat. Um die Wirkungsweise eines Priority-Schedulers des OS-Task Managements zu untersuchen, wurde mit Hilfe der Simulationssprache GPSS eine Studie durchgeführt. Die Ergebnisse sind in einem Bericht niedergelegt. Für den Anfang des Jahres installierten Microfilm-Plotter wurden verschiedene Software-Änderungen durchgeführt. Sie hatten zum Ziel, den Durchsatz des Gerätes zu beschleunigen. Dem Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried wurde Unterstützung gewährt bei der Implementierung des AMOS Systems auf einer SIEMENS 4004/150 Anlage. Ab Herbst 1972 läuft das AMOS System auf der SIEMENS Anlage. Ein in ALGOL 60 geschriebenes Programm für die Netzplantechnik wurde völlig neu konzipiert und in ALGOLW geschrieben. Es hat eine bedeutend höhere Arbeitsgeschwindigkeit und einige neue Funktionen, insbesondere für die Kostenplanung. Planungsarbeiten für den Anschluß einer IBM 370/145 an die IBM 360/91 liefen an. Die Aufstellung der neuen Anlage, die über eine schnelle Kanal-Kanalverbindung an die /91 angeschlossen werden soll, ist für Herbst 1973 vorgesehen.

OBERFLÄCHENPHYSIK

(Kommissarische Leitung H. Vernickel)

An der inneren Wand einer Plasmaapparatur laufen Prozesse ab, die zu einem Teilchen- und Energieaustausch zwischen Plasma und Wand und zur Wanderosion führen. Dabei spielt die Wechselwirkung zwischen Ionen bzw. schnellen Neutralteilchen und Metallen eine große Rolle. Diese Vorgänge bildeten daher auch im Berichtsjahr, wie in den zurückliegenden Jahren, einen wichtigen Teil des Forschungsprogramms. Gegenstände der Untersuchung waren vor allem Festkörperzerstäubung, Ionenrückstreuung sowie die beim Ionenbeschuss erzeugten Veränderungen der Oberflächenstruktur - beschußinduzierte Strahlenschäden einerseits und das Phänomen der Blasenbildung andererseits.

Die Methoden zur Oberflächenanalyse wurden weiter ausgebaut, so die Ionenrückstreuung, die Elektronenspektroskopie und die Sekundärionenspektroskopie, letztere insbesondere in der Form der Ionenmikrostrahlsonde.

Die Untersuchungen zur Wechselwirkung von Plasmen mit Quarzgefäßen und die Überlegung zur Wanderosion in Fusionsreaktoren wurden fortgesetzt.

Im September fand am Institut, organisiert von der Abteilung Oberflächenphysik, eine internationale Tagung über "Ionen-Oberflächen-Wechselwirkung, Zerstäubung und verwandte Phänomene" statt. In ca. 75 Vorträgen wurde ein Überblick über den neuesten Stand des Wissens geboten /13/.

1. Einzeluntersuchungen

1.1 Wasserstoff- und Heliumionenbeschuss mit 50-150 keV (PHARAO)

(W. M.⁺: R. Behrisch⁽¹⁾, J. Roth, H. G. Schöffler, B. M. U. Scherzer, R. Weißmann; T. M.⁺: H. Schmidl, H. Wacker)

Eine Methode zur Untersuchung von Strahlenschäden durch Ionenbeschuss mit Hilfe der Protonen-Rückstreuung wurde früher beschrieben⁽²⁾. Erste Messungen mit 0,5 - 7 keV He⁺-Ionen an Nb wurden durchgeführt. Sie zeigen wesentlich andere Ergebnisse als bei Si, das bisher am besten untersucht ist (Abb. 1).

⁺ W. M. und T. M. bedeutet Wissenschaftliche Mitarbeiter bzw. Technische Mitarbeiter.

(1) Bis 5. 5. 1972 als Gast in der Solid State Division des Oak Ridge National Lab.

(2) H. Schulze: Dissertation TU München 1971 und IPP 7/3 (1970).

Für diese Messungen werden besonders fehlerfreie Nb-Einkristalle verwendet (die uns dankenswerterweise vom Oak Ridge National Laboratory zur Verfügung gestellt wurden). Diese Kristalle zeigen besonders in doppelter Ausrichtung (Ioneneinfall und -beobachtung in dichtgepackten Kristallrichtungen) eine stärkere Reduktion der Rückstreuung als bei den bisher verwendeten Kristallen.

Die Untersuchungen über den Beitrag der Rückstreuung leichter Ionen zur Zerstäubung wurden abgeschlossen /244, 245/ und mit theoretischen Ergebnissen, die mit Hilfe der Sigmundschen Theorie gewonnen wurden, verglichen /246/.

Die Messungen der Vielfachstreuung in dünnen Folien, über die im Vorjahr berichtet wurde, ergaben kleine Abweichungen zwischen Theorie und Experiment. Durch Messungen an mehreren übereinanderliegenden Folien konnte der Einfluß der Kristallkornstruktur unterdrückt werden. Die verbleibenden Abweichungen ermöglichen eine Korrektur des theoretischen Wechselwirkungspotentials für bestimmte Stoßparameterbereiche.

1.2 2,5 MeV-Beschleuniger

(W. M. : R. Behrisch, W. Eckstein, B. M. U. Scherzer, H. Verbeek; T. M. : H. Schmidl, S. Schrapel)

Die Ionenrückstreuung ist eine neuartige Methode zur zerstörungsfreien Untersuchung von Festkörpern bis in eine Tiefe von einigen 10^4 \AA . Sie gestattet insbesondere folgende Messungen:

Analyse und Lokalisierung von Fremdatomen sowie die Bestimmung der Tiefenverteilung;

Bestimmung von Gitterfehler- und Strahlenschädenkonzentration sowie ihre Tiefenverteilung. In gewissen Grenzen ist auch die Bestimmung der Art der Gitterfehler möglich;

Schichtdickenmessung dünner Schichten (genauer: Bestimmung der Flächendichte von Atomen mit hohem Z).

Wasserstoffionen mit "Fusionstemperatur" (10 bis 20 keV) haben im Festkörper eine Eindringtiefe von ca. 10^3 \AA . Um die dabei erzeugten Gitterfehler mit Ionenrückstreuung analysieren zu können, benötigt man Primärenergien von ein bis einigen MeV. Mit diesen Primärenergien kann man zweitens über die Schichtdickenmessung ⁽³⁾ Zerstäubungsausbeuten bestimmen an Folien, die so dick sind, daß sie für 10 - 20 keV-Ionen noch als massiv betrachtet werden können.

Um solche Messungen durchzuführen, wurde ein 2,5 MeV-Van-de-Graaff Beschleuniger (der Firma High-Voltage) angeschafft. Der Beschleuniger wurde im Berichtsjahr aufgebaut und in Betrieb genommen. Im weiteren Verlauf sollen die beiden Beschleuniger BOMBARDON (1-20 keV) und PHARAO (20-250 keV) mit dem MeV-Beschleuniger so kombiniert werden, daß die Proben im gleichen Targettopf ohne Unterbrechen des Vakuums beschossen und analysiert werden können. Vorarbeiten für den in diesem Zusammenhang nötigen Umbau von BOMBARDON wurden durchgeführt.

1.3 Ionenbeschuß bis 20 keV (BOMBARDON)/IPP 9/7/.

W. M. : W. Eckstein, H. Verbeek; T. M. : R. Hippele, S. Schrapel)

Die Rückstremessungen von Protonen und Ne^+ -Ionen im Energiebereich von 5-15 keV an polykristallinen Targets /83/ wurden ergänzt durch Messungen an Vanadium- und Nickel-Einkristallen. Die Rückstreuungsspektren der Protonen werden stärker durch Channeling-Effekte beeinflusst als die der Ne^+ -Ionen. In den

(3) R. Behrisch, R. Weißmann: Phys. Letters 30A, 506 (1969)

Ne^+ -Spektren zeigen sich Abweichungen von der Streuung im Zweierstoß mit Oberflächenatomen /82/. Die Messungen wurden mit Modellrechnungen (in Zusammenarbeit mit H. G. Schäffler) verglichen.

Die Rückstreuenspektren von 15 keV Protonen an Einkristallen zeigten neuartige Strukturen. Computer Simulation (H. G. Schäffler) ergab, daß der Einfluß der elastischen Energieverluste in Mehrfachstößen den der inelastischen überwiegt. Damit wird die Anwendbarkeit des "single-collision"-Modells, das bei höheren Energien erfolgreich verwendet wird, in Frage gestellt /80/.

Messungen der Zerstäubungsausbeuten von Nb bei Beschuß mit Deuterium im Energiebereich von 5 bis 15 keV wurden in Zusammenarbeit mit PHARAO (B. M. U. Scherzer) durchgeführt /81/. Die gemessenen Ausbeuten sind etwa einen Faktor 2 kleiner als man aus Extrapolation von Literaturwerten erwarten würde. Gleichzeitig ist auch der mit 100 keV-Protonen an den gleichen Proben gemessene Energieverlust an Elektronen größer als erwartet. Weitere Messungen zur Aufklärung dieser Diskrepanzen sind im Gang.

Untersuchungen zur Blasenbildung auf Metalloberflächen nach Beschuß mit leichten Ionen sind angelaufen.

1.4 Ionenbeschuß bis 3000 eV (SORBAS)

(W. M. : W. Heiland, E. Taglauer ⁽⁴⁾; T. M. : F. Schuster)

Die Messungen über die Rückstreuung von He^+ -Ionen an geordneten Adsorptionsschichten von Sauerstoff auf Nickel (vgl. Jahresbericht 1971), die eine Bestätigung des Modells der Rekonstruktion im Fall der (2x1)-Struktur auf Ni (110) führten, wurden abgeschlossen /130/. Das Auftreten von Einkristalleffekten wurde bei der Rückstreuung von Ne^+ und Ar^+ -Ionen an einer Ni (110)-Oberfläche untersucht. Im Fall der Ne-Streuung können die beobachteten Spektren durch ein Modell erklärt werden, das den Streuvorgang als eine Folge binärer Stöße entlang eindimensionaler Ketten beschreibt /235, 127/.

Die Ar-Spektren weichen von diesem einfachen Verhalten in zweifacher Hinsicht ab. Zum einen treten durch Oberflächenfehler dosisabhängige Änderungen der Spektren auf, Abb. 2. Durch vergleichende Messungen der Reflexbreiten bei der Beugung langsamer Elektronen, konnte der Zusammenhang der Ionenrückstreuenspektren mit den Baufehlern der Oberfläche nachgewiesen werden, Abb. 3 /128/. Zum anderen zeigen die Ar-Spektren eine Abweichung vom Modell der binären Stoßfolgen, Abb. 4. Dieses Verhalten ist möglicherweise auf eine beginnende Wechselwirkung der Ionen mit dem Gitter (binärer Stoß = Wechselwirkung eines Ions mit nur einem Gitteratom) zurückzuführen.

1.5 Oberflächen- und Tiefenanalyse mit AUGER-Spektroskopie und "Disappearance Potential Spectroscopy"

(W. M. : J. Kirschner, P. Staib; T. M. : W. Baierl, J. Zinser)

Die AUGER-Elektronenspektroskopie, die eine empfindliche Bestimmung der chemischen Zusammensetzung einer Oberfläche erlaubt, wird als Kontrollmethode für Ionenzerstäubung benutzt. Das Präparat wird mit einem Argon-Ionenstrahl zerstäubt und die Änderungen der chemischen Zusammensetzung der erodierten Fläche werden gemessen. So wird eine Tiefenanalyse des Präparats durchgeführt. Die Tiefenauflösung ist durch vom Ionenstrahl erzeugte Strahlenschäden begrenzt, wie Messungen an gespaltenen Glimmerflächen gezeigt haben /231/. Die AUGER-Spektren werden numerisch behandelt, um eine exaktere Abschätzung der experimentellen Intensitäten der AUGER-Linien zu erlauben und den Vergleich mit theoretisch gerechneten Werten zu erleichtern /233, 230/. Die Rechenprogramme werden von M. Walter auf der IBM/360 erprobt und in assembler Sprache für die N0812, die an das Experiment angeschlossen ist, übersetzt. Abb. 5 zeigt den Verlauf der ausgewerteten AUGER-Linien von Glimmer für wachsende Beschußdosis mit Ar^+ von 500 eV Energie.

(4) Beurlaubt zum IBM Res. Lab., San Jose, USA, ab 1.2.1972

Eine neue Methode zur Elektronenspektroskopie an Oberflächen benutzt die Änderung des Koeffizienten für quasielastische Reflexion von Elektronen, wenn charakteristische Anregungsschwellen von Oberflächenatomen erreicht werden (in Analogie zu der bekannten Appearance Potential Spectroscopy nennen wir sie Disappearance Potential Spectroscopy : DAPS). Wie das Schema (Abb. 6) zeigt, werden Elektronen von einem Heizfaden mit variabler Beschleunigungsspannung auf ein metallisches Target geschossen, dessen Fermi - Niveau niederfrequent um Massepotential moduliert wird. Von dem kugelförmigen Gegenfeld-Energieanalysator werden bei geeignetem ΔU nur die quasielastisch reflektierten Elektronen zu dem ebenfalls kugelförmigen Kollektor durchgelassen. Der abgestimmte Schwingkreis filtert die Modulationsfrequenz oder deren Harmonische aus und führt sie dem Lock-in-Verstärker zu. Auf diese Weise erhält man in der Schalterstellung "DAPS" die erste bzw. zweite Ableitung des Reflexionskoeffizienten nach der Energie. (In der Stellung "AUGER" wird mit der gleichen Anordnung AUGER-Elektronenspektroskopie betrieben). Bei einer Anregungsschwelle ist die Energie eines einfallenden Elektrons gerade ausreichend, um ein Elektron aus einer niedrigeren Schale (z. B. Cr(LIII)) emporzuheben in eines der niedrigsten unbesetzten Niveaus, d. h. zum Fermi-Niveau. Das anregende Elektron gibt all seine Energie ab, und "verschwindet" damit aus dem Strom der reflektierten Elektronen. Der Reflexionskoeffizient nimmt also an einer Anregungsschwelle in einer Stufe ab, sodaß seine erste Energieableitung einen Peak an dieser Stelle zeigt.

In dem gezeigten Beispiel einer oxydierten Edelstahl-Oberfläche (Abb. 7) sind einige Anregungsschwellen der Elemente O, Cr, Mn, Fe deutlich zu erkennen. [Kurve a): 1. Ableitung; Kurve b): 2. Ableitung des Reflexionskoeffizienten]. Die Methode ist wegen der geringen Eindringtiefe der Elektronen sehr empfindlich speziell auf die Oberfläche. Sie kann - komplementär zur AUGER-Spektroskopie - Information geben über die elementare Zusammensetzung der Oberfläche.

Änderungen der elektronischen Eigenschaften der Oberfläche lassen sich deutlich nachweisen. So konnten Linienaufspaltungen beobachtet werden wenn Sauerstoff an einer Titan-Oberfläche adsorbiert wird.

1.6 Erzeugung spin-polarisierter Elektronen durch Feldemission

(W. M. : W. Eckstein, N. Müller; T. M. : W. Ottenberger)

Das in den Vorjahren beschriebene Experiment zur Feldemission spinpolarisierter Elektronen aus EuS-bedeckten Wolframspitzen wurde fortgeführt. Nach einer Verbesserung der Eichung des Polarisationsdetektors muß die gefundene Spinpolarisation mit $(89 \pm 7)\%$ angegeben werden /186,185/. Für einen statischen Betrieb der Apparatur wurde ein wassergekühlter ausheizbarer 7 kOe-Magnet gebaut und getestet. Die früher bei einem statischen Magnetfeld gefundene Magnetronenentladung tritt bei hinreichend gutem Vakuum (besser $2 \cdot 10^{-10}$ Torr) und nicht zu großen Feldstärken nicht auf.

Die im Vorjahr erwähnten Rechnungen zur Depolarisation in dem elektrischen und magnetischen Feld vor der Spitze wurden ergänzt.

2. Untersuchungen zur direkten Plasma-Wand-Wechselwirkung

2.1 Theta-Pinch-Experiment

(W. M. : G. Haas, P. Meischner; T. M. : F. Sabathil)

Die Vorbereitungen für die Laser-Streuung wurden abgeschlossen und ein Gaseinlaßsystem installiert. Bei beiden Maßnahmen mußte berücksichtigt werden, daß das Vakuum-System, im Gegensatz zu üblichen Theta-Pinch-Anlagen, voll ausheizbar sein soll.

Es wurde begonnen das "Multipacting", wie es beim Gasaufzehrungsexperiment als Mittel zum Elektronenbeschuß verwendet wird, als Zündhilfe einzusetzen. Da dafür der Wandzustand - insbesondere ihr Sekundärelektronen-koeffizient - bedeutsam ist, gibt das Zündverhalten einen Hinweis auf den jeweiligen Wandzustand.

Die Leistung eines Senders (max. 14 MHz, 4 kVss) wurde über eine Manschette kapazitiv in das Entladungsrohr eingekoppelt. Bis zu 5m Torr Fülldruck herab war so eine sichere Zündung möglich. Desorbiert wurden vor allem H_2O , CO und CO_2 .

2.2 Wasserstoffaufzehrung in Quarz-Gefäßen

(W. M. : G. Haas; T. M. : F. Sabathil)

Das im Bericht von 1970 beschriebene Experiment zum Studium der Reaktion atomaren Wasserstoffs mit Quarz-Gefäßen mit Hilfe der Gasaufzehrung wurde in wesentlichen Teilen abgeschlossen. Dabei interessierte, wie stark die Aufzehrung durch vorherigen Elektronenbeschuß der Wand mittels Multipacting beschleunigt werden kann und wie schnell die Rate nach dieser Aktivierung wieder zurückgeht. Aus dem zeitlichen Verlauf der Aufzehrung $p(t)$ bzw. $\dot{p}(p)$ wurden mittlere Reaktionsquerschnitte der durch den Elektronenbeschuß gebildeten Zentren (locker gebundener oder nur adsorbierter Sauerstoff) für die Reaktion mit Wasserstoffatomen bestimmt. Sie liegen zwischen einigen 10^{-19} und einigen 10^{-18} cm^2 .

Auch die Aktivierbarkeit der Aufzehrung durch Elektronenbeschuß sollte eine Ermüdung zeigen, da der gesamte Sauerstoffgehalt der Oberfläche abnimmt. Das konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Ein möglicher Grund dafür ist, daß bei der erhöhten Temperatur (500°C), auf der das Quarzrohr gewöhnlich zur Verhinderung von Wasseradsorption gehalten wurde, die sauerstoffarme Schicht (SiO_2) verdampft. Deshalb wurde das Experiment mit einem Quadrupolmassenspektrometer ausgerüstet, das so eingebaut ist, daß es von der Wand des Quarzrohres desorbierte Moleküle unmittelbar nachzuweisen erlaubt. Messungen mit dieser Anordnung sind angelaufen.

2.3 Überlegung zur Wanderosion in Fusionsreaktoren

(R. Behrisch ⁽¹⁾, H. Vernickel)

Wie im letzten Jahresbericht dargelegt, kann man für stationäre und quasistationäre Reaktoren Obergrenzen der durch Zerstäubung bewirkten Wanderosion aus einer Energiebetrachtung ableiten. Dies wurde zunächst durchgeführt unter der Annahme, daß die die erste Wand treffenden Teilchen monoenergetisch sind /239/. Die Überlegungen wurden auf den Fall verschiedener Energieverteilungen der Teilchen ausgedehnt. Falls es nicht gelingt, den Wandbeschuß durch Divertoren drastisch zu reduzieren, so wird nach diesen Rechnungen die Wandzerstäubung nur vernachlässigbar, wenn die "Temperatur" der die Wand beschießenden Atome und Ionen unter ca. 50 eV liegt /12,15/.

Während des Gastaufenthaltes in Oak Ridge fertigte R. Behrisch eine zusammenfassende Arbeit über die verschiedenen Wanderosionsmechanismen an /12/.

2.4 Deutsches Memorandum zur Fusionsreaktortechnologie

Mitarbeiter der Abteilung waren an der Erstellung des zweiten Kapitels ("Plasma-Wand-Wechselwirkung") des Memorandums beteiligt, vor allem die Herren G. Haas, B. M. U. Scherzer und H. Vernickel.

3. Entwicklung apparativer Methoden

3.1 Mikrostrahlsonden

(W. M. : R. Guckenberger ⁽⁵⁾, H. Heil ⁽⁶⁾, W. Hofer ⁽⁷⁾, H. Liebl; T. M. : W. Daser, H. Schlamp)

Mit der kombinierten Ionen- und Elektronenmikrosonde wurden die ersten Anwendungen gemacht. Daneben wurden Zusatzeinrichtungen, hauptsächlich elektronischer Natur, zur Vereinfachung und Verbesserung der Betriebsweise installiert. Insbesondere wurde zur Erhöhung der Nachweisempfindlichkeit der Sekundärionennachweis auf Einzelteilchenzählung umgestellt. Weiterhin ermöglicht eine Impulsregistrierung eine digitale Verarbeitung der Signale, sowie den Einsatz einer "elektronischen Apertur", welche besonders für Tiefenprofilanalysen verwendet werden soll. Diese wurde fertiggestellt und befindet sich in Erprobung.

An der Feldionen-Mikrosonde wurden die Testmessungen fortgeführt. Computerrechnungen zur Ermittlung der Aberrationskonstanten der hier verwendeten Aperturlinse wurden abgeschlossen /121/.

Es wurde eine weitere Mikrosondenapparatur entworfen und deren Konstruktion begonnen. Diese Apparatur wird eine neuartige Strahloptik zur Erzielung noch höherer räumlicher Auflösung enthalten /172/.

3.2 Mehrfach fokussierendes Laufzeit-Massenspektrometer

(M. W. : G. -H. Oetjen, W. Poschenrieder; T. M. : J. Volkenandt)

Der Analysator wurde in Betrieb genommen. Zur Untersuchung der Fokussierung sind Ionenpulse von etwa 100 ns Dauer erforderlich. Es zeigte sich, daß mit der bisherigen Ionenquelle so kurze Ionenpulse nicht mehr durch Pulsung des ionisierenden Elektronenstrahls erzeugt werden können. Nach einem Umbau der Ionenquelle wird die Pulsung des Ionenstrahls jetzt durch Ablenkung über den Eintrittsspalt des Analysators vorgenommen. Mit dieser Anordnung wurde eine Auflösung $\frac{M}{\Delta M} = 400$ erreicht. Bei der vorgegebenen relativen Energiebreite der Ionen $\Delta E/E = 0,5\%$ würde eine gewöhnliche feldfreie Driftstrecke eine Auflösung $M/\Delta M = 200$ ergeben. Dieses Ergebnis zeigt bereits den Einfluß der Geschwindigkeitsfokussierung. Um zu einer genaueren Analyse der Analytoreigenschaften zu kommen, speziell zum Vergleich mit der Rechnung 2. Ordnung (Fokussierungsfehler) - erfolgten weitere Ein- und Umbauten.

3.3 Energieanalysator für Elektronenspektroskopie (AUGER- und ESCA-Spektroskopie)

(W. M. : P. Staib; T. M. : J. Zinser)

Es wurde eine verbesserte Version des neuentwickelten Energieanalysators (/228/und IPP 9/5) gebaut, die trotz kompakter Abmessungen ein hohes Auflösungsvermögen erlaubt /229/. Der Analysator ist für Photo- und Augerelektronenspektroskopie konzipiert. Er besteht aus zwei symmetrischen Teilen A und B, die Anordnungen von sphärischen konzentrischen Gittern bilden (Radien 5,0 und 8,0 cm, siehe Abb. 8). Die Eintrittsblende E befindet sich im Zentrum der Gitter A, die mittels einer geeigneten Spannung U_A ein Abbremsfeld für die Elektronen erzeugen. An den Gittern B ist eine Beschleunigungsspannung angelegt. Die Elektronen, die diesen Teil erreichen, werden radial beschleunigt. Die Eintrittsblende D eines Detektorsystems ist am Krümmungszentrum von Teil B angebracht. Diejenigen Elektronen, die den Teil B mit

(5) Bis 30. 9. 1972

(6) Gastforscher

(7) Seit 1. 7. 1972

geringeren kinetischen Energien erreichen (viel kleiner als eU_B) bekommen eine annähernd radiale Bahn und werden auf D scharf fokussiert. Die anderen verpassen die Blende und werden nicht nachgewiesen. Die wesentlichen Eigenschaften des Analysators sind:

1. Kleine Abmessungen: Durchmesser 9cm, Abstand zwischen Eingangs- und Detektorblenden 17 cm.
2. Große Lichtstärke: die Fläche der Eintrittsblende beträgt ca. 10 mm und der volle Eingangswinkel 40° .
3. Hohes Auflösungsvermögen: bis 0,06% ohne Abschirmung des Erdmagnetfeldes.

3.4 Aufbau und Untersuchung einer Ionenquelle für langsame Edelgasionen

(W. M. : M. Grundner, W. Heiland, E. Taglauer; T. M. : F. Schuster)

Für Rückstreuungsmessungen und Zerstäubungsverfahren im Energiebereich unter 2 keV werden Ionenquellen mit speziellen Eigenschaften benötigt. Zur Optimierung einer solchen Ionenquelle wurden deren Strahleigenschaften, Energiebreite, Massenreinheit u. s. w. in Abhängigkeit der verschiedensten Parameter ausgemessen⁽⁸⁾. Typische optimale Werte bei 1 keV Primärenergie sind nach diesen Untersuchungen: $40 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ Stromdichte, 6 eV Energiebreite und 1,1 mm Halbwertsbreite des Strahlprofils für Ar^+ -Ionen.

3.5 Gemeinsame technische Einrichtungen

a) Laborwerkstätte

(T. M. : R. Heilmeier, R. Klein)

Der Laborwerkstätte obliegt die Anfertigung von Zusatzteilen und Ersatzteilen für die Experimente, soweit sie nicht von der Abteilungswerkstätte (die wir gemeinsam mit Abt. 2 haben) bzw. den zentralen Werkstätten gefertigt werden. Ferner führt sie die Bestellplanung und Koordinierung, konstruktive Beratung und z. T. auch die Gerätewartung durch. Als spezielle Aufgaben im Berichtszeitraum ist die Anfertigung von Multipliern mit Aluminium-Dynoden für die Einzelteilchenzählung im UHV sowie der Aufbau der beam-lines für den 2,5 MeV-Beschleuniger zu erwähnen.

b) Glastechnik und Targetpräparation

(T. M. : H. Kukral)

Neben der Ausführung von Routinearbeiten an den Pümpständen entwickelte und baute die glastechnische Werkstätte Hochspannungsdurchführungen und abgeschirmte Durchführungen in Sinterglas- und Druckglas-technik mit Sonderspezifikationen. Sie fertigt ferner Elektroden- und Linsensysteme für die Ionen- und Elektronenoptik.

Für die Herstellung von Dünnschichtpräparaten und Vielschichtpräparaten aus ultrareinen Metallen wurde eine UHV-Aufdampfanlage mit Widerstands- und Elektronenstrahlverdampfung angeschafft. Im Berichtszeitraum wurden Folien und Mehrschichtpräparate aus den verschiedensten Metallen für Zerstäubungsmessungen, Ionenstrommessungen und Untersuchungen auf dem Gebiet der AUGER-, ESCA- und DAPS-Analyse gefertigt. Da, wie erwähnt, sehr hohe Probenreinheit erforderlich war, mußten z.T. Versuchsreihen zur Ermittlung der günstigsten Aufdampfparameter durchgeführt werden.

⁽⁸⁾ Diplomarbeit M. Grundner, TU München 1972

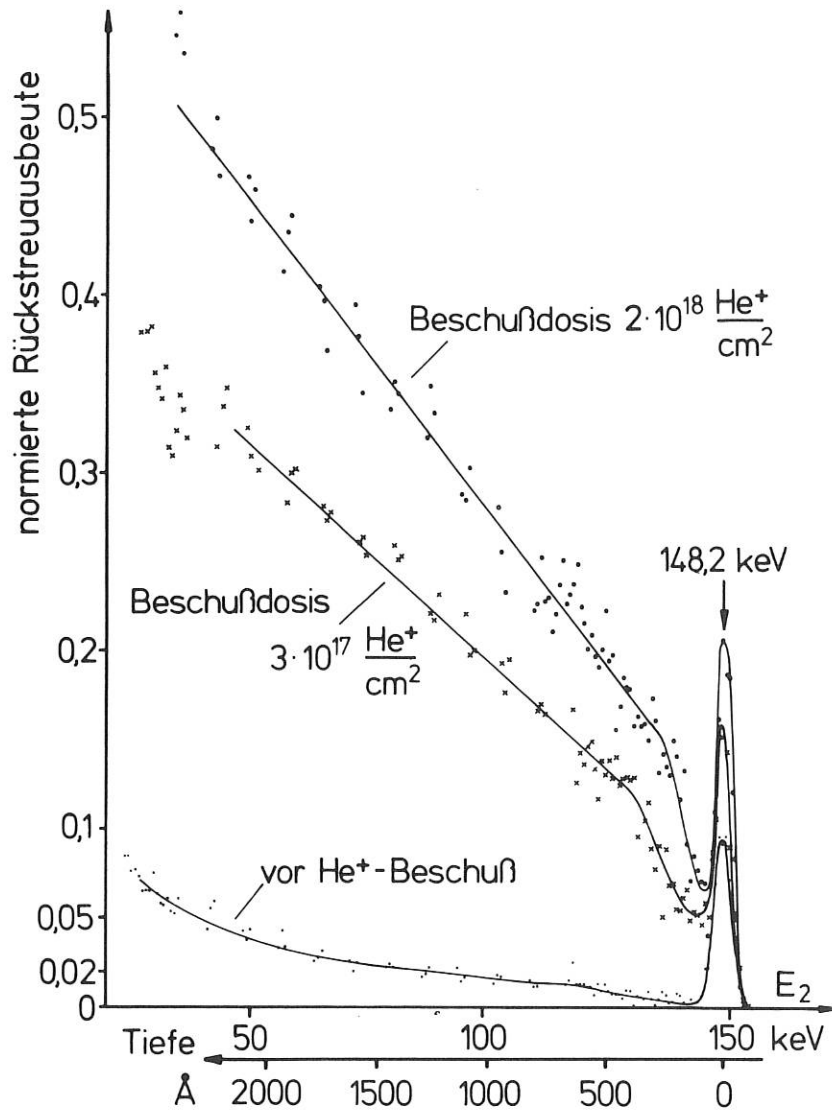


Abb. 1 Normierte $\langle 100 \rangle / \langle 111 \rangle$ -Rückstreuspektren von 150 keV H^+ -Ionen an einem Nb-Einkristall, vor und nach Beschuß mit 4 keV He^+ Ionen. Die Rückstreuung erhöht sich nach Beschuß über den ganzen gemessenen Tiefenbereich und läßt im Gegensatz zu Messungen anderer Autoren an Halbleitern keine begrenzte Zone hoher Strahlenschädigung erkennen. Die untere Abszissen-skala gibt die Tiefe an, aus der die Protonen zurückgestreut werden.

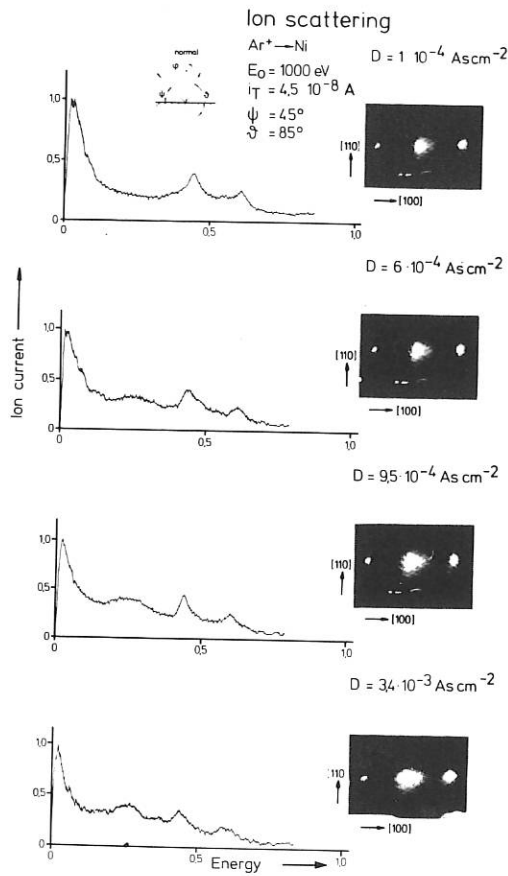


Abb. 2 Energieverteilung rückgestreuter Ar⁺-Ionen und LEED-Aufnahmen einer Ni-Einkristall (110)-Oberfläche in Abhängigkeit von der Beschußdosis bei fester Primärenergie E₀ und konstantem Targetstrom i

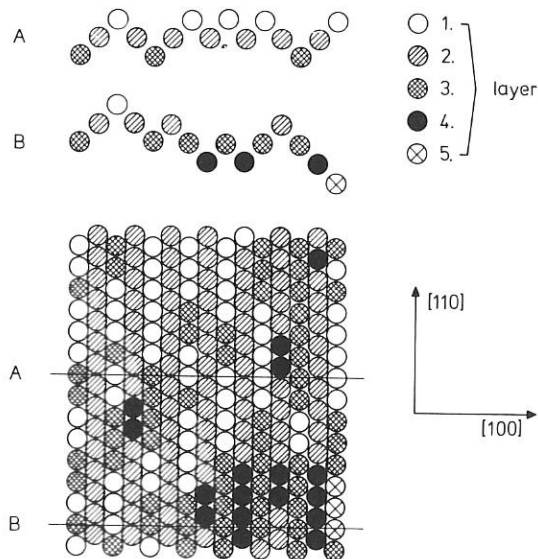


Abb. 3 Modell des Ni(110) Oberflächenzustandes, der beim Ar-Ionenbeschuß entsteht. Die Ketten in [110] -Richtung bleiben teilweise erhalten, dazwischen entstehen Gräben, deren Flanken von (111)-Ebenen gebildet werden.

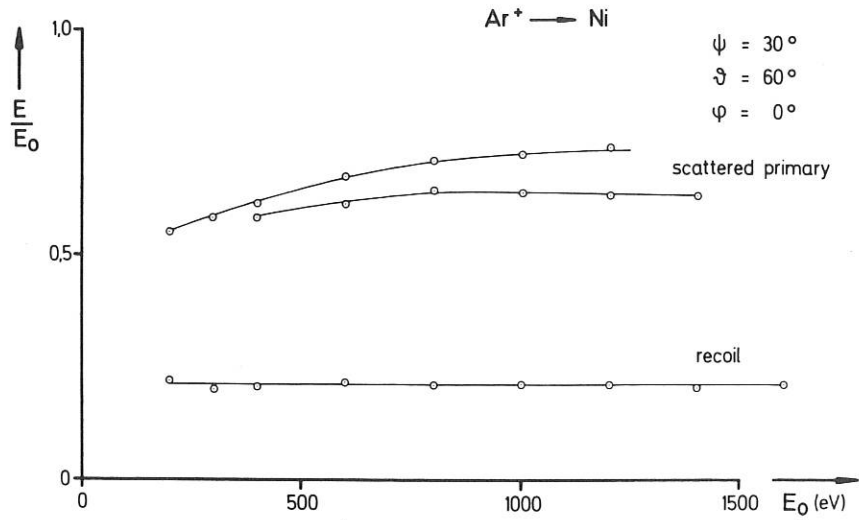


Abb. 4 Energie E der rückgestreuten Ar^+ -Ionen (scattered primary) und der im Zweierstoß zerstäubten Ni^+ -Ionen (recoil) in Abhängigkeit von der Primärenergie E_0 bei festem Einschubwinkel ψ und Streuwinkel θ . Bei einem Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$ ist die Streuebene senkrecht zur beschossenen (110)-Ni-Fläche und parallel zu den $[110]$ -Ketten in dieser Oberfläche. Während die recoil-Ionen das erwartete Verhalten $E \sim E_0$ zeigen, treten bei den rückgestreuten Ionen Abweichungen von diesem Verhalten auf.

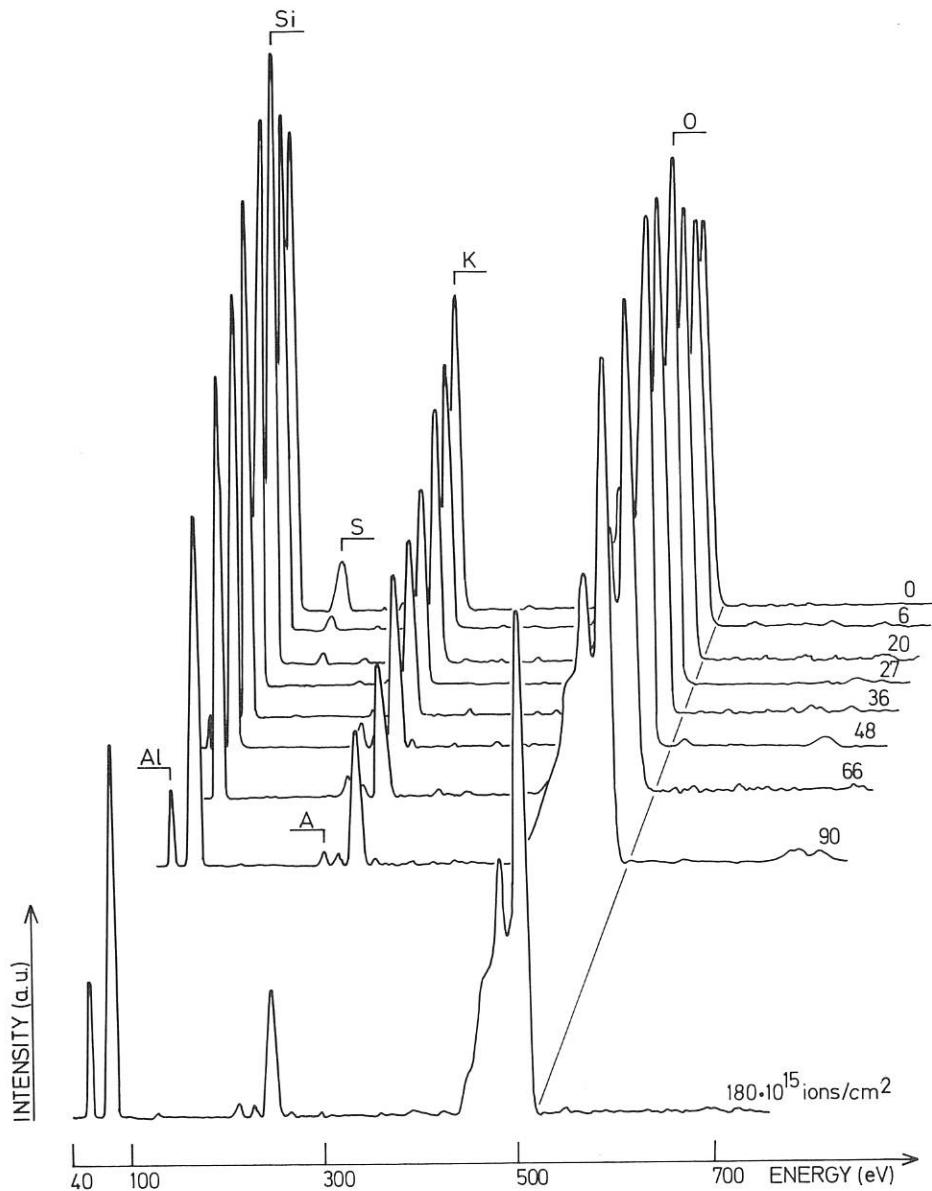


Abb. 5 Ausgewertete AUGER-Linien von Glimmer für wachsende Beschußdosis.

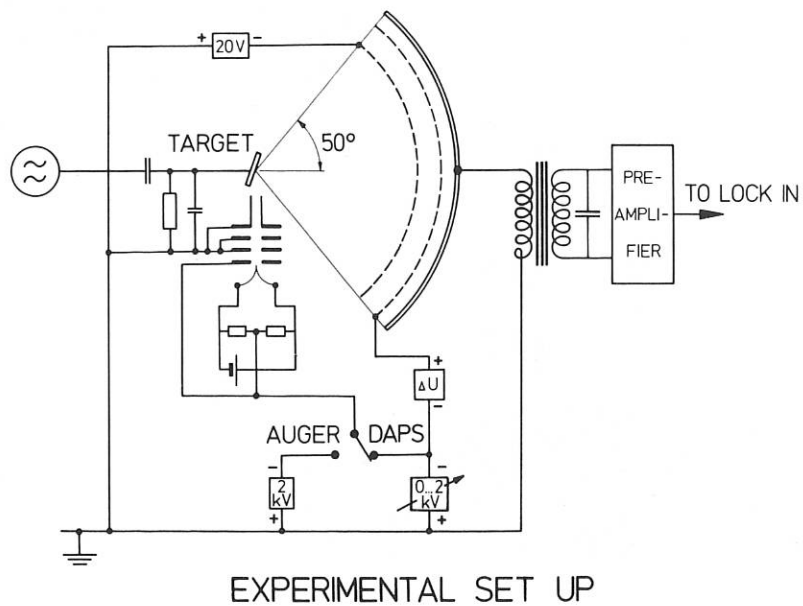


Abb. 6 Schematischer Aufbau einer Apparatur zur "Disappearance-Potential"- und "AUGER"-Spektroskopie an Oberflächen.

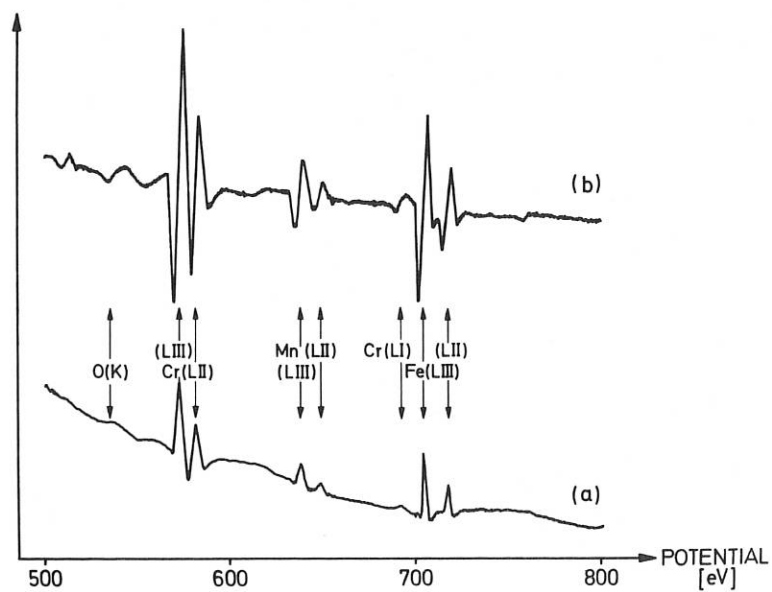


Abb. 7 DAPS-Spektrum einer oxydierten Edelstahl-Oberfläche. Aufgetragen ist die 1. (Kurve a) und 2. Ableitung (Kurve b) des elastischen Reflexionskoeffizienten über dem Beschleunigungspotential der Elektronen.

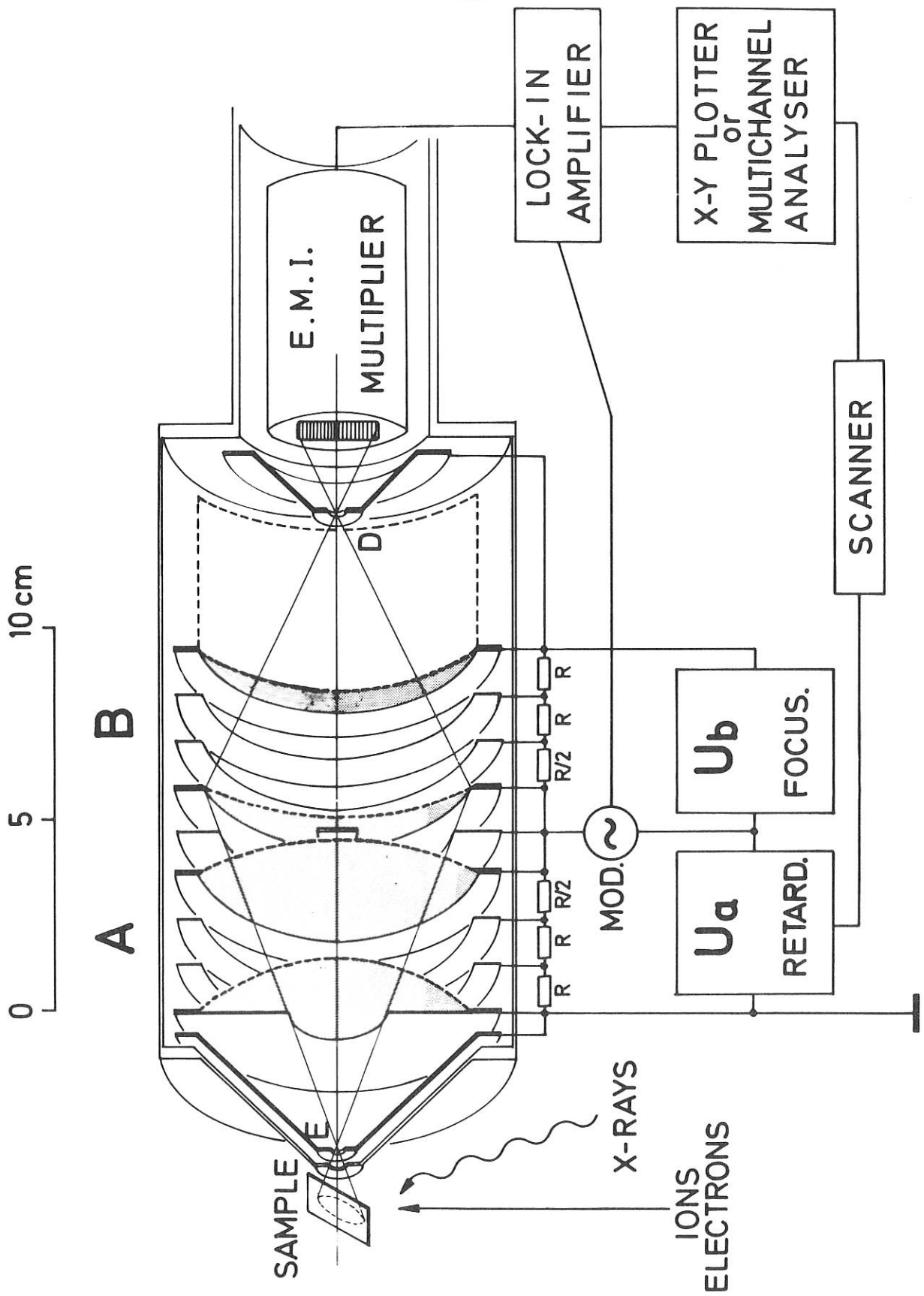


Abb. 8 Energieanalysator für AUGER- und ESCA-Spektroskopie.

RELATIVISTISCHE PLASMEN

(Prof. A. Schlüter)

Die Tätigkeit dieser Abteilung konzentriert sich auf die Entwicklung eines sogenannten Elektronenring-Beschleunigers. Hierbei sollen Ionen im kollektiven Feld relativistischer Elektronen beschleunigt werden. In einem ersten Experiment konnten Elektronenringe gebildet und komprimiert werden, die mit ihren Daten von $N_e = 5 \times 10^{12}$; $R = 2,5$ cm und $r = 0,6$ cm eine innere Feldstärke von ca. 15 MV/m für das Halten von positiven Ionen ergaben. Mit diesem Ergebnis wurde dieses Experiment abgebrochen und ein erweitertes Experiment aufgebaut, bei dem eine Beschleunigungsstrecke für mit Ionen beladene Elektronenringe vorgesehen ist.

Umfangreiche theoretische Arbeiten und numerische Rechnungen befassten sich mit Gleichgewichtsproblemen, mit Stabilisierung von Betatronschwingungen, mit der Untersuchung von kollektiven Effekten auf kohärente und inkohärente Betatronschwingungen, mit Magnetfeldkonfiguration für verschiedene Beschleunigerversionen, mit Fragen der Elektrooptik in den Feldemissionsröhren, die als Elektronenquellen dienen, sowie mit den elektromagnetischen Vorgängen in einem Hochspannungs-Impulsgenerator.

1) Das Elektronenringexperiment: (IPP 0/10, IPP 0/11, IPP 0/15)

(C. Andelfinger, R. Griek, W. Herrmann, I. Hofmann, D. Jacobi, A.U. Luccio, U. Schumacher, M. Ulrich)

Im Frühjahr 1972 wurde das 1. Ringexperiment abgeschlossen. Die dabei erzielten Ergebnisse sind im wesentlichen im Jahresbericht 1971 festgehalten. Die erreichten Ringfeldstärken ("holding power") von ca. 15 MV/m erschienen uns ausreichend, um an ein Experiment zur Beschleunigung von mit Ionen beladenen Ringen zu denken. Zu diesem Zweck wurde im Berichtsjahr das "Schuko I"-Experiment (IPP 0/10) aufgebaut (Abb. 1), welches eine kurze Beschleunigungsstrecke enthält, um die kritischen Anfangsphasen der Ringbeschleunigung zu untersuchen.

In Abb. 2 ist eine Hälfte dieser Spulenordnung, die aus einer speziell geformten einwindigen Spule besteht, zu sehen. Ihre Länge beträgt 75 cm, ihr Durchmesser ca. 32 cm. Die Kompressionsebene, gleichzeitig Einschussebene, ist durch eine eingedrehte Mulde ausgezeichnet, die den für die Kompression gewünschten Feldindexverlauf ergibt (Abb. 3). Nach rechts schliesst sich dann eine Expansions-Beschleunigungsstrecke an, die durch Querschnittsänderung der Spule eine B_r -Komponente von etwa 5 G bei einem B_z -Feld von 20 kG hat. Dies ist ausreichend, um mit Ringen der erhofften Qualität nach Durchlaufen von ca. 30 cm auf Ionenenergien von ca. 3 MeV/Nucleon zu kommen. Die Kompression der Elektronenringe erfolgt in 9 μ sec. Jedoch werden die kritischen Betatronresonanzen in etwa 100 nsec durchlaufen, d.h. etwa 40 mal so schnell wie im 1. Experiment. Insbesondere erwarten wir eine geringere Ringaufweitung durch die Walkinshaw-Resonanz ($n = 0.2$). Die anfängliche Kompressionsgeschwindigkeit ist $dR/dt = 0.2$ cm/T, mit der Umlaufzeit $T = 3$ nsec.

Für die Teilcheninflektion auf die Einschuss-Sollbahn wurden umfangreiche Einzelteilchenrechnungen durchgeführt. Abb. 4 gibt den Zeitverlauf von R eines aus dem Zentrum des eingeschossenen Phasenraumes kommenden Elektrons wieder.

Gegen Ende der Kompression geht der Feldindex gegen Null (homogenes Feld). Dadurch kreuzt man während der Ionenbeladung die $\nu_R = 1$ Resonanz. Rechnungen ergaben, dass die Überlagerung eines azimuthalen Magnetfeldes B_φ die Betatronfrequenzen in günstige Bereiche verschiebt und gleichzeitig die Landau-Dämpfungskoeffizienten für kollektive transversale Instabilitäten erhöht. Die Anwendung von B_φ -Feldern ergibt eine Verkoppelung der axialen und radialen Elektronenbewegung und es müssen andere Inflektionsbedingungen gefordert werden (IPP 0/11). Abb. 5 zeigt den radialen und axialen Phasenraum für den Einfang zweier aufeinanderfolgender Umläufe am Ende des Inflektionsimpulses. Erste Versuche werden mit dem neuen Ringkompressor durchgeführt. Dazu kann durch eine ovale Einschussöffnung von 13×17 mm ein 2 MeV-Elektronenstrom von maximal 450 A eingeschossen werden. Zur Diagnostik wird wieder die Röntgenstrahlung des auf einen dünnen Draht auflaufenden Elektronenringes, das magnetische Eigenfeld des Ringes und in der Endphase der Kompression das Synchrotronlicht benützt. Im komprimierten Ring wurden maximal 5×10^{12} Elektronen gefunden. Dies ergab sich sowohl für 450 A als auch 220 A Einschußstrom. Die Ursachen dafür können in kollektiven Effekten bei der Inflektion und/oder in den ersten Phasen der Kompression liegen. Detaillierte Untersuchungen hierzu und zur Geometrie des Ringes im komprimierten Zustand stehen bevor. Ähnlich verhalten sich die Teilchenzahlen, die durch Selbstinflektion (20 %) eingefangen werden.

Gegen Ende der Kompression werden starke radiale kollektive Schwingungen mit der Frequenz $(1 - \nu_R)\omega_0$ beobachtet, die für das Auftreten von "resistive wall - Instabilitäten" sprechen. Ein auf der Magnetfeldachse angebrachter leitender Stab, der so geformt ist, dass der Feldindex leicht erhöht wird, dämpft erheblich die Schwingungsamplitude.

Überlegungen zu Beschleunigerstrukturen mit statischem Magnetfeld:

Denkt man an einen funktionierenden Elektronenring-Beschleuniger mit hoher Repetitionsrate (10 Hz) und langem Expansionsfeld (einige m), dann ist es wünschenswert, diese Felder statisch, evtl. supraleitend, zu betreiben. Hierfür wurden 2 Konfigurationen ins Auge gefasst.

1. Die "sustained field" Methode, bei der das statische Feld von 20 kG für die Zeit des Teilcheneinschusses durch ein gepulstes Feld umgekehrten Vorzeichens auf den Einschusswert reduziert wird. Dieses gepulste Feld hat auch für den richtigen zeitlichen Verlauf des Feldindices zu sorgen. Zweierlei Schwierigkeiten treten dabei auf. Einmal ist das Strahlführungssystem gegen das 20 kG-Gleichfeld abzuschirmen, zum anderen ist eine Genauigkeit des statischen und des gepulsten Feldes von 10^{-4} erforderlich.
2. Eine Kombination von einem statischen Feld für die Expansionsbeschleunigerstrecke und einem gepulsten Feld für die Ringkompression vermeidet obige Schwierigkeiten (IPP 0/15). Abb. 6 zeigt eine derartige Kombination. Die Ringkompression erfolgt in r- und in z-Richtung. Im statischen Feld ist eine schwache magnetische Flasche

einbezogen, die als sogenannter Wartesaal dienen soll, um den durch Stossionisation gebildeten Ionen Zeit zur Erreichung höherer Ionisationsstufen zu geben. Am Ort des Elektroneneinschusses beträgt das statische Feld nur 200 G, im Gegensatz zu 20 kG in obiger Konfiguration, die leichter im Strahlrohr zu kompensieren sind.

2) Theoretische Arbeiten

Zur Beschleunigung relativistischer Elektronen - Ionen Ringe (P. Merkel)

Für den Elektronenringbeschleuniger ist die Frage nach der maximalen Beschleunigung des Ringes in einem elektrischen oder inhomogenen magnetischen Feld wichtig. Bei der Beschleunigung werden beide Teilchensorten von den elektromagnetischen und Trägheits-Kräften gegeneinander polarisiert. Übersteigt die auf die Ionen wirkende Trägheitskraft die elektrische Bindungskraft an die Elektronen, gehen die Ionen verloren. Eine erste Näherung für die obere Grenze der Beschleunigung gewinnt man aus der Annahme, dass alle Ionen durch das maximale elektrische Feld, die sogenannte "holding power", gebunden sind.

Genauer wurde das Problem in Strahlgeometrie und magnetohydrodynamischer Näherung mit konstantem elektrischem Beschleunigungsfeld untersucht. Versuche, mit Hilfe integraler Sätze wie Virialsätzen eine Abschätzung der Grenzbeschleunigung zu gewinnen, hatten keinen Erfolg. Zur Beantwortung dieser Frage scheint die Lösung des Gleichgewichtsproblems bei Beschleunigung unumgänglich. Für den unbeschleunigten Strahl relativistischer Elektronen und ruhender Ionen ist von Bennett eine Lösung angegeben worden. Bennett'sche Gleichgewichte sind möglich für ein Teilchenzahlverhältnis $N_i/N_e: \frac{A}{\gamma^2} < \frac{N_i}{N_e} < 1$; N_e (N_i) Zahl der Elektronen (Ionen), $\gamma = (1 - \frac{v^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}}$. Für kleine Beschleunigung sind Gleichgewichte gefunden worden durch Entwicklung um die Bennett'sche Lösung. Diese Lösungen liefern zwar keine Aussage zur Grenzbeschleunigung, jedoch das wichtige Resultat: die mögliche Beschleunigung ist eine Funktion des Teilchenzahlverhältnisses N_i/N_e . An den Grenzen $\frac{N_i}{N_e} = 1$, $\frac{N_i}{N_e} = 1/\gamma^2$ ist keine Beschleunigung möglich. Maximale Beschleunigung wird erreicht werden in der Nähe von $N_i/N_e = 1/\gamma$.

Stabilisierung von axialen Betatronschwingungen (I. Hofmann)

Hierzu wurden die Fokussierungseigenschaften eines sogenannten "squirrel cage" (Zylinder aus parallelen Metallstreifen und Zwischenräumen) untersucht. Bei solcher Anordnung wirken auf den aussen oder innen liegenden Elektronenring die auf dem Streifen entstehenden Bildladungen, während azimuthale Bildströme, die defokussierend wirken, unterbunden werden. Für die Konfiguration eines "squirrel cage's" ausserhalb und eines leitenden Zylinders (B_φ -Stab) innerhalb des Elektronenringes wurden die am Ort des Ringes erzeugten Felder und ihre Gradienten numerisch berechnet. Mit einem Approximationsverfahren wurde das unendliche Gleichungssystem der Fourierkomponenten der Felder gelöst. Die Abhängigkeit von Streifenzahl, -breite und Abstand zum Elektronenring wurde untersucht.

Einfluss der Raumladung auf Betatronschwingungen (I. Hofmann)

Zur Untersuchung der Wirkung kollektiver Effekte auf kohärente und inkohärente Betatronschwingungen wurde ein numerisches Programm entwickelt, das für eine Gesamtheit von Elektronen zweidimensional die Bewegungsgleichungen löst, wobei die äusseren Felder, die Wechselwirkungskräfte untereinander und die Kräfte durch Bildladungen und Bildströme auf der Wand berücksichtigt werden. Damit konnte gezeigt werden, dass durch kollektive Wirkung ohne aktive Inflektion etwa 25 % der eingeschossenen Elektronen eingefangen werden. Im Experiment werden etwa 20 % gefunden.

Adiabatische zeitabhängige Gleichgewichte eines mit Ionen beladenen Elektronenringes

(I. Hofmann)

Für ein Verständnis der Eigenschaften eines beladenen Elektronenringes wünscht man sich selbstkonsistente quasistationäre Gleichgewichtslösungen. Unter Ausnützung der adiabatischen Invarianten der Einzelteilchenbewegung kann die Lösung der Vlasov-Gleichung für die Elektronen- und Ionenverteilung während der Ionisierungsphase auf reine Phasenraum- und Zeitintegrationen zurückgeführt werden. Die Teilchentrajektorien gehen nur in Form zeitlicher Mittelwerte ein. Eine iterative numerische Auswertung ist im Gange.

Einfluss von B_φ auf die Ringstabilität (W. Herrmann, C. Pellegrini)

C. Pellegrini findet in einem unveröffentlichten Bericht (Interner Bericht RP-N20) eine Instabilität, die bei Anwesenheit eines B_φ -Feldes die Anzahl der Elektronenumläufe im Beschleuniger auf $N < (2\pi\alpha h)^{-1}$ beschränkt ($\alpha = \frac{B_\varphi}{B_z}$, $h = \frac{B_r}{B_z}$). In einem Computerprogramm wurden die Bahnen zweier Elektronen im Expansionsfeld mit überlagertem B_φ verfolgt. Die Elektronen waren durch eine elektrische Kraft aneinander gekoppelt. Weder in dem Fall, bei dem die Ringmasse durch die Elektronen bestimmt ist, noch in dem Fall, bei dem die Ringmasse durch die Ionen bestimmt ist, konnte ein instabiles Anwachsen der kleinen Ringdimensionen gefunden werden.

3) Experimente zur Weiterentwicklung von 2 MeV Elektronenquellen

a) Feldemissionsröhren (IPP O/12, IPP O/13, 1) (W. Dommaschk, J. Fink, W. Ott)

Die Arbeiten für einen starken und brillanten Elektronenstrahl mit 2 MeV Energie wurden weitergeführt. Insbesondere wurden verschiedene Kathodenanordnungen miteinander verglichen. Es ergab sich kein wesentlicher Unterschied zwischen Rasierklingen und Nadelkathoden gleicher Grösse. Als kritisch erwies sich die abgesaugte Stromdichte. Unter einem bestimmten Wert (Grössenordnung 300 A/cm^2) wurde die Emission unreproduzierbar. Bei grösseren Stromdichten hat das Raumladungspotential vor der Kathode eine stabilisierende Wirkung. Eine Optimierung der Parameter erbrachte einen maximalen nutzbaren Strom von 450 A in einer Admittanz von $120 \times 170 \text{ mm}^2$, bei einer Gesamtemission von 1000 A. Dies kann zunächst als ausreichend für das Elektronenringexperiment betrachtet werden.

Mit einer in ihrem Aufbau einfacheren Röhre wurden Emittanzmessungen gemacht (Abb. 7). Mit sehr kleinen Teilemittanzen von $0,7 \times 0,7$ mrad cm ergaben sich in der zeitlichen Struktur der Ströme starke Schwankungen, die für sehr schnelle lokale Veränderungen der Teilkathodenflächen sprechen, wie z.B. Verdampfung von feinen Spitzen (whisker). In grösseren Teilemittanzen mitteln sich diese Schwankungen aus. Solche Messungen ergaben eine Quellenemittanz von 110 mrad cm für einen Strom von 600 A. Für diese relativ hohe Quellenemittanz wurde noch keine Erklärung gefunden. Für die Berechnung der Elektronenoptik in den Feldemissionsröhren wurde die Stabilität der Potentialfortsetzung vom Strahlrand in den Aussenraum verbessert. Dazu wurde ein von Garabedian angegebenes Verfahren benützt, bei dem die numerische Rechnung auf bestimmte komplexe Werte der Koordinaten ausgedehnt wird. Mit den früheren Rechnungen ergab sich Übereinstimmung bis zu 2 cm vom Strahlrand. Das neue Verfahren zeigt keine Singularitäten im praktisch interessierenden Raumbereich.

b) Laserelektronenquelle (E. Buchelt, G. Siller)

Die früheren Versuche mit einer mit Rubin-Laserlicht bestrahlten Kathode ergaben nutzbare Ströme, die denen von Feldemissionskathoden vergleichbar waren. Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn das dabei produzierte Plasma sich vor Anlegung der Saugspannung etwas expandiert hatte. Mit elektronischen Bildwandleraufnahmen und elektrischen Sonden wurde die Expansionsgeschwindigkeit v und die Grössenordnung der Plasmadichte n_e gemessen. Dabei ergab sich die Expansionsgeschwindigkeit proportional zur Wurzel aus der Laserenergie und lag bei ca. 10^7 cm/sec. Die Elektronendichte wurde aus dem äquivalenten Plasmawiderstand zwischen Doppelsonden bestimmt. Dabei wurde eine Elektronentemperatur von 10 bzw. 100 eV vorausgesetzt. Damit ergaben sich in einem Kathodenabstand von 5 cm Werte von $n_e \approx 5 \times 10^{13}$ cm⁻³ für 10 eV, bzw. $n_e \approx 1,5 \times 10^{14}$ cm⁻³ für 100 eV. Der Vergleich in verschiedenen Abständen ergab ein cubisches Verhalten der Elektronendichte. Auf eine Bestimmung der Elektronentemperatur mittels Laserstreuung wurde verzichtet, da das plasmaerzeugende Laserlicht für die Messung zu viel Falschlicht ergibt. Vergleichende Messungen mit einem CO₂-Laser (1 MW), der den Vorteil einer hohen Repetitionsrate (1/10 Hz) hat, ergaben wesentlich geringere Elektronendichten. Die Versuche wurden abgebrochen, da zunächst die Feldemissionsröhren Strahlen ausreichender Qualität liefern.

c) Impulsgenerator, bestehend aus Blumleinkabel und Transformationsleitung
(E. Buchelt, W. Dommaschk, H.B. Schilling, G. Siller)

Der im Bericht 1971 beschriebene Impulsgenerator wurde fertiggestellt und zunächst im 200 kV-Bereich getestet. Infolge der zu grossen Schalterinduktivität ist die Impulsform noch nicht zufriedenstellend. Einige Mühe kostete es, den Jitter der vier parallelen Funkenstrecken auf 1 - 2 nsec herabzusetzen. Zur Verringerung der Schalterinduktivität wird eine ringförmige Funkenstrecke mit 4 - 6 Kanälen gebaut. Im Transformationsenteil wurde der berechnete Spannungsverstärkungsfaktor von 2,4 erreicht.

Daneben wird ein Rechenprogramm entwickelt, mit dem die elektromagnetischen Vorgänge in einer beliebigen abgeschlossenen rotationssymmetrischen Anordnung simuliert werden sollen. Die Meridianschnitte der Gebietsgrenzen und der metallischen Berandungen sind beliebig vorgebbare Kurvenstücke. Der vorläufige Zweck des Programmes ist das Finden geeigneter Randbedingungen für oben erwähnten Impulsgenerator, unter denen der gewünschte zeitliche Verlauf des Impulses erzielt wird.

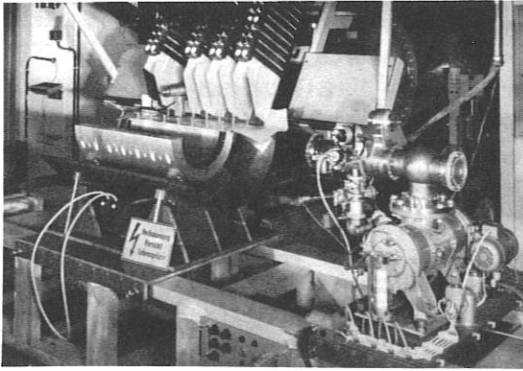


Abb. 1 Schuko I - Experiment

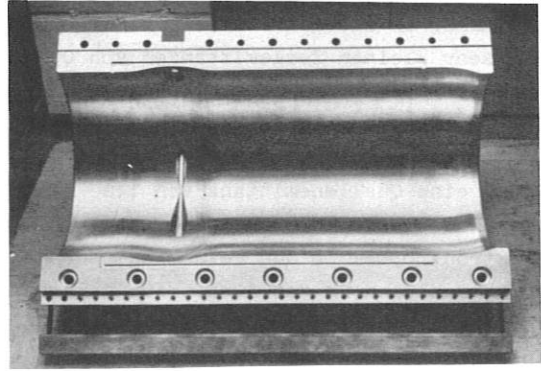


Abb. 2 Eine Hälfte der Kompressorspule

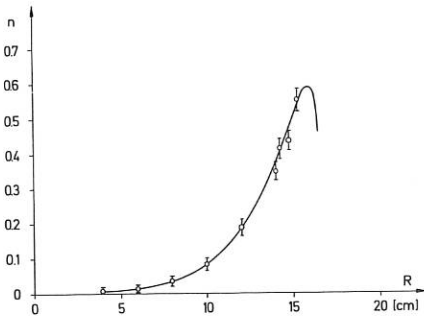


Abb. 3 Radialer Verlauf des Feldindex n (Messpunkte mit Fehlerschranken)

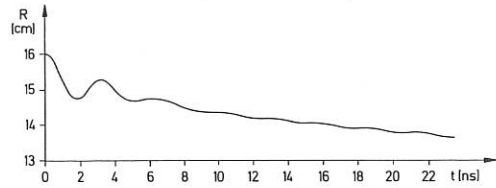


Abb. 4 R (t) eines inflektierten Elektrons

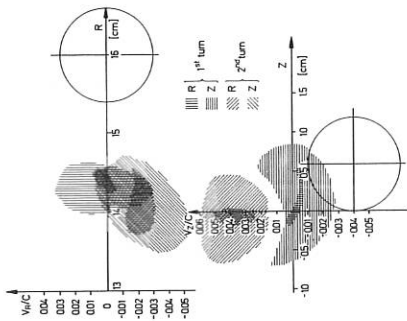


Abb. 5 Radialer und axialer Phasenraum von zwei inflektierten Umläufen am Ende des Inflektionsimpulses

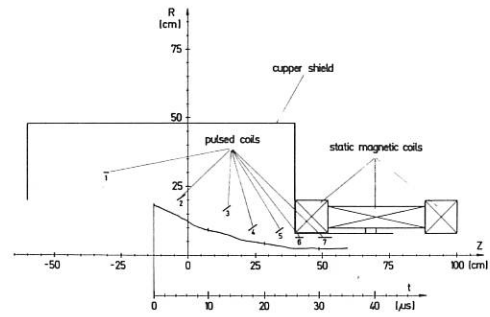


Abb. 6 Kombinierte Anordnung eines statischen und gepulsten Kompressorfeldes

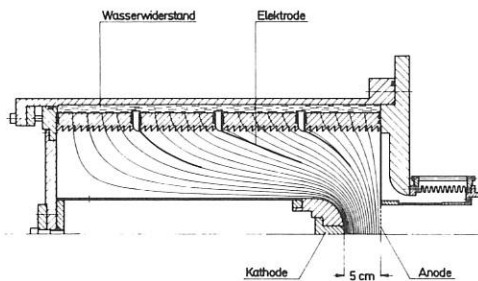


Abb. 7 Feldemissionsröhre

ABTEILUNG TECHNIK

(Dipl.-Ing. K.H. Schmitter)

In keinem der zurückliegenden Jahre befand sich im Institut eine ähnlich große Zahl umfangreicher und technisch komplexer Experimente in der Definitions-, Planungs- oder Bauphase wie im Jahre 1972. Die Abteilung konnte deshalb personell nicht mehr alle in ihr Arbeitsgebiet fallende Aufgaben der Institutsprojekte allein wahrnehmen. Ingenieuraufgaben wurden zunehmend auch von Mitarbeitern experimenteller Abteilungen übernommen.

Das Auslaufen der Arbeiten am PULSATOR I, dessen Montage zum Jahresende im wesentlichen beendet war, ermöglichte eine zunehmende Konzentration auf das die Abteilung dann ab Mitte des Jahres personell am stärksten beanspruchende Projekt WENDELSTEIN VII. Aus dem Niedrig- β -Bereich sind außerdem noch Arbeiten für WEGA und WENDELSTEIN VI zu erwähnen. Für WEGA wurde der toroidale Magnet mit Traggerüst geplant, und für W VI nach weiteren umfangreichen Untersuchungen die Wicklung der supraleitenden Ringe hergestellt.

Im Vergleich zum Niedrig- β -Gebiet fielen die vorwiegend hochspannungstechnischen Aufgaben für Hoch- β -Experimente, wie beispielsweise den 1 MJ-BELT PINCH II, den 250 kV-Beltpinch oder ISAR T1 weniger ins Gewicht, weil hierfür tragfähige Grundlagen aus früheren Arbeiten vorhanden waren. Im Hinblick auf sehr große Stoßstromanlagen für Plasmamaschinen und Laser wurde die Entwicklung hochspannungstechnische Bauelemente und Systeme vorsorglich fortgesetzt. Es sei hier nur auf das als ein Ergebnis dieser Arbeiten vorgestellte kompatible Funkenstreckensystem verwiesen. Für sehr große Energieinhalte können supraleitende induktive Speicher interessant werden, wenn die Lösung ihrer Schalt- und Energietransferprobleme gelingt. Deshalb wurde eine Untersuchung der Lösbarkeit dieser kritischen Aufgaben eingeleitet.

Auf dem Gebiete der Lasertechnik war das Projekt "Entwicklung eines 100 J/1 ns- CO_2 -Lasers" Mittelpunkt der Arbeiten. Es gelang einen Oszillator aufzubauen, der mit Hilfe eines optoakustischen Modenkopplers und eines lasergetriggerten Pulsspektierers die zur Steuerung des Lasers erforderlichen Einzelimpulse von 1 ns Dauer mit guter Reproduzierbarkeit liefert. Auch der Prototyp für die Sektionen der ersten Verstärkerstufe wurde bereits entwickelt und erfolgreich erprobt. Weitere Aktivitäten betrafen den Neodym-Glaslaser, den Stickstofflaser und die chemischen Laser. Außerdem wurde für den geplanten 1000 J/0.5 ns Jod-Laser der Abteilung E4 die Pumpbatterie (Endausbau ca. 1 MJ) entsprechend ein 70 kJ-Testbatterie errichtet.

In der Elektronik war die Entwicklung wesentlich durch die zunehmende Verbreitung digitaler Techniken in der experimentellen Plasmaphysik geprägt. Vor allem standen hier Interface-Systeme für PDP 11-Prozessoren im Vordergrund der Arbeiten.

Die Fusionsreaktortechnologie erfuhr eine Erweiterung durch die Aufnahme neuer Themen. Im Rahmen von Systemstudien wurden zur Tokamak-Konfiguration technisch-ökonomische Skalierungs- und Optimierungsbedingungen ermittelt. Für kommende Untersuchungen stationärer und quasistationärer toroidaler Reaktorsysteme wurde das Rechenprogramm THESIS entwickelt. Andere Arbeiten betrafen die Themenkreise Tritium, Wandbelastung, Kühlung, Magnetfeldsysteme und Strahlenschäden an Supraleitern.

1. Technische Beiträge zu den experimentellen Arbeiten im Institut

1.1 Stoßstromanlagen für Hoch- β -Experimente

1.1.1 1 MJ-Experiment Belt Pinch II¹

(E. Breit, J. Gruber, G. Klement, A. Knobloch, H. Wedler, G. Wulff)

Die Konstruktion des toroidalen Experimentes Belt Pinch II wurde in enger Zusammenarbeit mit der Abt. 1 im ersten Halbjahr durchgeführt. Am Anfang des Jahres stand der Lebensdauertest von 4 Kondensatoreinheiten (je 8 kJ) mit offenen Dreielektrodenfunkenstrecken als Startschalter und Zweielektrodenferritfunkenstrecken als Crowbarschalter im Vordergrund. Bei 950 Crowbarentladungen und 85 schwingenden Entladungen wurde eine Fehlzündrate von 1,2% pro Schaltersystem durch Vorzündungen des Startschalters festgestellt (Abb. 1). Der Elektroden-

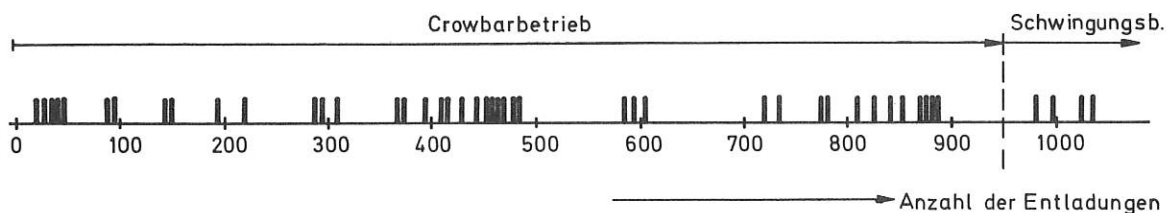


Abb. 1: Verteilung der Vorzündungen, gemessen an 4 parallelen Schaltkreisen

abbrand war geringfügig. Nach dem Ersetzen aller PVC-Isolierteile durch Polyamid- und Polyäthylenteile und nach einer Vergrößerung der gegenseitigen Schalterabstände konnten bei weiteren 400 Entladungen keine Fehlzündungen mehr festgestellt werden. Die Messung der Stromübernahme am Crowbarschalter ergab Verzugszeiten bis 4 μ sec. Durch die große anteilige Lastinduktivität wirken sich diese jedoch nur geringfügig auf die Welligkeit des Laststromes aus.

Daten des Testkreises:

Gespeicherte Energie	4 x 8 kJ
Ladespannung	40 kV
Entladefrequenz	7,85 kHz
Strom im Startschalter	20,5 kA max, 16,5 Asec
Strom im Crowbarschalter	40 kA max, 25 Asec
Crowbarzeitkonstante, 1/e-Abfall	1,67 msec

Parallel zum Vortest liefen die Überlegungen für das Spulen- und Kollektorsystem. Mit Rücksicht auf das pulsförmige Magnetfeld B_{ϕ} von max. 1 Tesla $\hat{=} 1 \text{ kp/cm}^2$ Magnetfelddruck wurde die 32 segmentige Hauptfeldspule selbsttragend und kraftentkoppelt zum Glasgefäß konzipiert. Die Berechnung des Spulenwiderstandes für verschiedene Werkstoffe und Wand-

¹E. Breit, J. Gruber, A. Knobloch: Proc. 6th Symp. on Fusion Technology, Grenoble, Oktober 1972.

stärken ergab für die gewählte Al-Legierung bei 8 mm Wandstärke eine ausreichend hohe Spulenzzeitkonstante zur Erzielung eines langen Crowbarpulses.

Die Anlage ist im Prinzip in Abb. 2 dargestellt. Die Batterie entspricht dem Grundkonzept des weitgehend modularen Aufbaues mit freier servicegerechter Zugänglichkeit aller Elemente. Alle Schaltfunkenstrecken und Triggergeneratoren sind in einem Schaltrack mit Schalldämmverkleidung untergebracht. Wichtige elektrische Bauelemente wurden in Auftrag gegeben: Die 40 kV Speicher- und Ladekabel, die 40- und 80 kV Triggerleitungen, Beschaltungselemente für die Funkenstrecken, die Lade- und Entladewiderstände und das Kurzschließersystem.

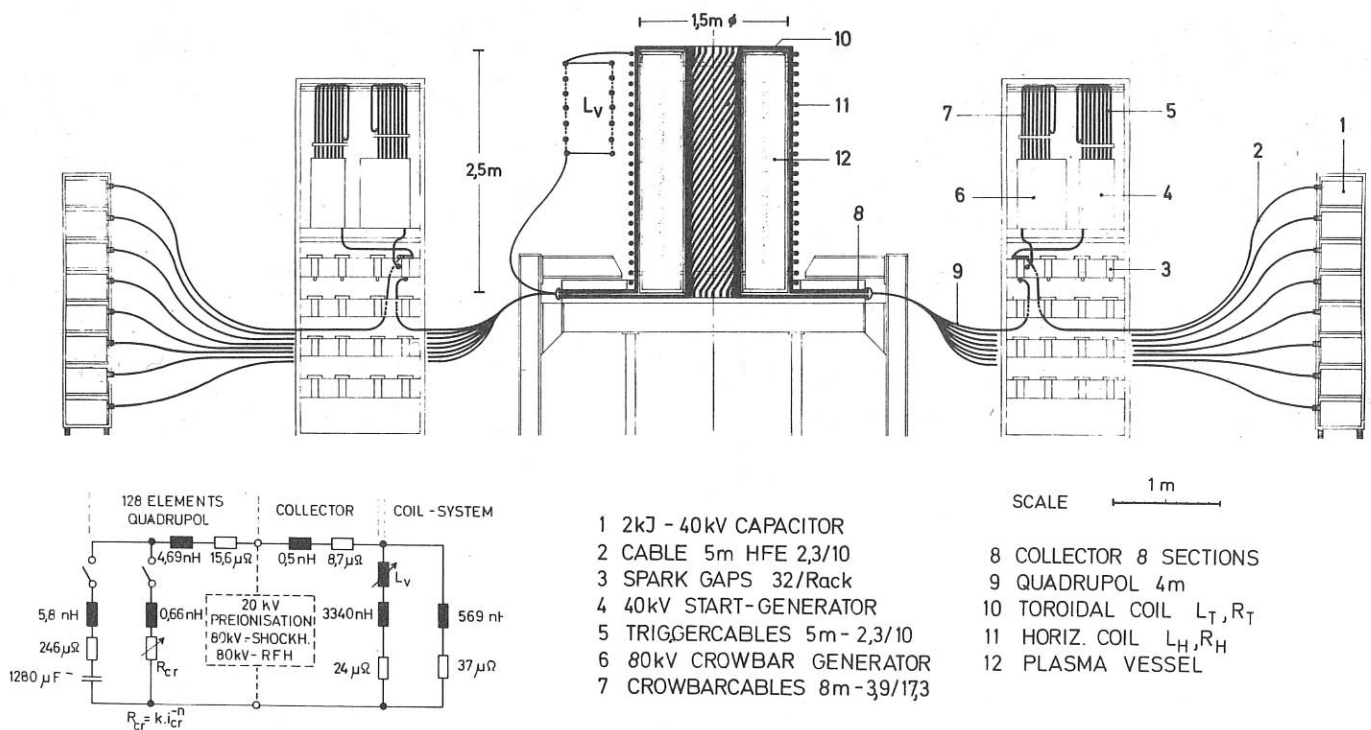


Abb. 2: 1 MJ Belt Pinch-Experiment, 40 kV-Hauptbatterie

Das Plasmasystem mit Experimentiertisch im Holzverbundsystem, helischem Spulensystem und Horizontalkollektor (Abb. 3) wurde in einem Zeitraum von 3 Monaten bis zur Fertigungsreife durchgearbeitet. Wesentliche Merkmale des Plasmasystems sind: mechanische Entkopplung von Plasmagefäß und Spulensystem, selbsttragende Tonnenkonstruktion der helischen Innenspule mit Holzkern (Abb. 4) und der toroidalen Außenspule aus 32 Aluminium-U-Trägern (Abb. 5). Obere und untere Spulensegmente sind einzeln demontierbar.

Das Plasmagefäß stellte wegen seiner ungewöhnlichen Größe die meisten Probleme. Die Möglichkeit eines Quarzgefäßes wurde mit den Fachfirmen diskutiert, jedoch aufgrund der Kostenvorstellungen für Versuchsfertigungen vorläufig nicht weiter verfolgt. In Zusammenarbeit mit der Industrie wurde die Entwicklung von dickwandigen Glasringen von 1500 mm Durch-

messer begonnen. Mit einer vom IPP entwickelten Glasgußform gelang nach anfänglichen Mißerfolgen Mitte Dezember die Herstellung des ersten Teilringes. Die hohen zu erwartenden Kosten und die schlechte Oberflächenbeschaffenheit des Gießlings veranlaßte uns, parallel dazu die Herstellung eines geklebten 32-segmentigen Poligongefäßes aus 3 cm dicken Glasstreifen zu versuchen. Bis zum Jahresende konnten erste Versuchsklebungen erfolgreich durchgeführt werden.

In Übereinstimmung mit der Terminplanung begann die Fertigung der Batterieteile im Mai und war im Dezember 1972 zu 90% abgeschlossen. Die Anlieferung der ersten Speicherkondensatoren erfolgte im August. Bis zum Jahresende waren 80% aller Kondensatoren geliefert und in die Batterie eingebaut.

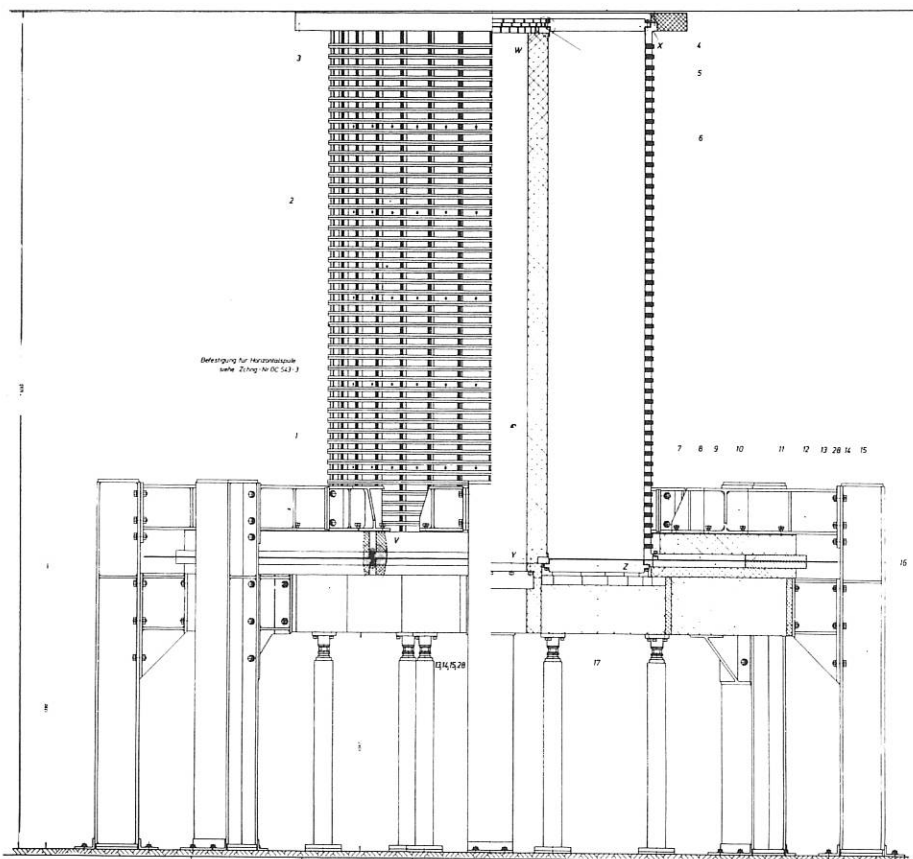


Abb. 3: 1 MJ Belt Pinch, Spulen- und Kollektorsystem.

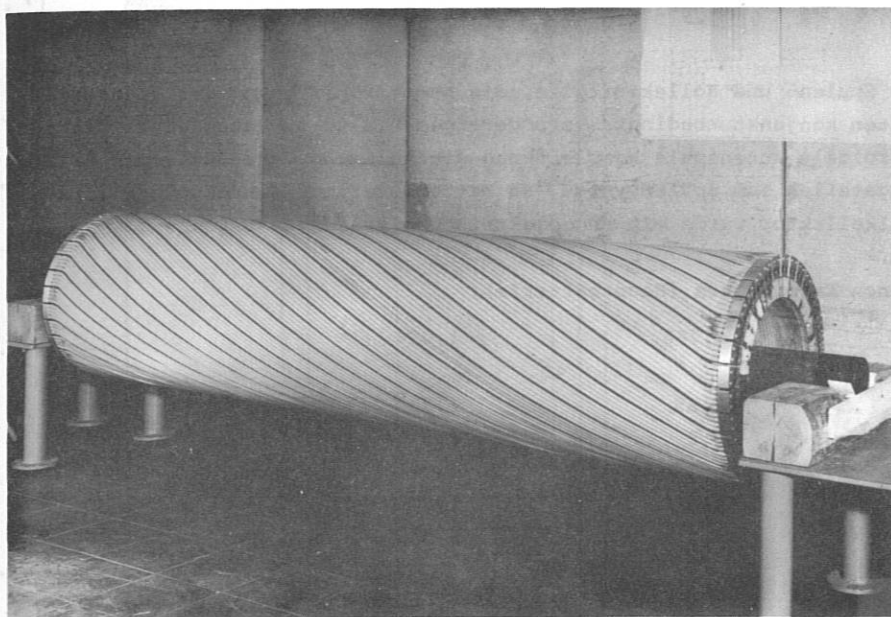


Abb. 4: 1 MJ Belt Pinch, Helische Innenspule

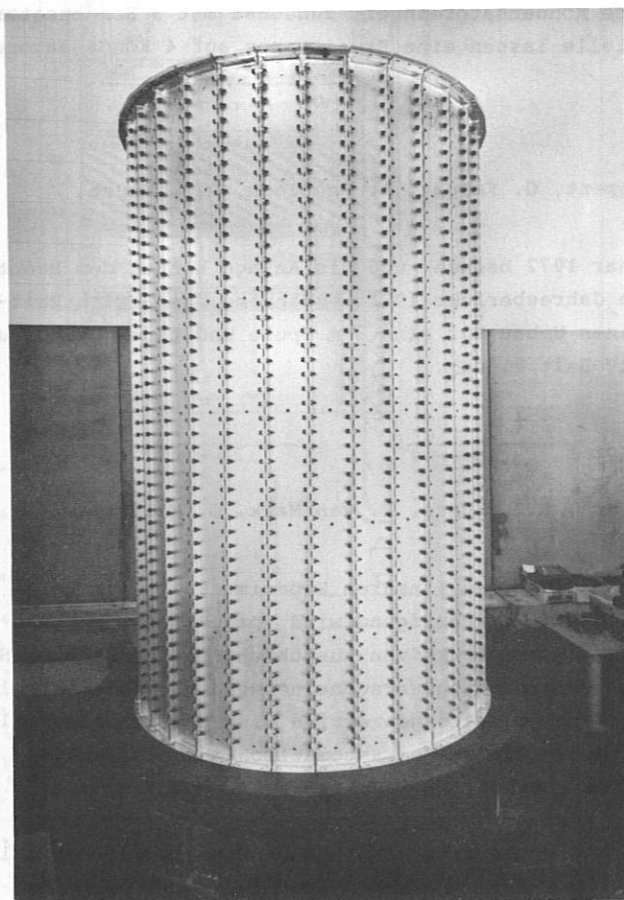


Abb. 5: 1 MJ Belt Pinch, B_{ϕ} -Außenspule

Bei der Lieferung der Spulen- und Kollektorteile, die hauptsächlich von der Industrie gefertigt wurden, traten konjunkturbedingte Verzögerungen bis zu 8 Wochen ein. Bis zum Jahresende war die toroidale Außenspule komplett und die helische Innenspule zur Hälfte montiert. An Wicklungsteilen zum Spulensystem, an Batterieteilen (Kondensatoren, Kabel etc) und an einem Teilkollektor wurde mit den elektrischen Prüfungen begonnen.

Daten des LMJ Belt Pinch-Experiments (Hauptbatterie):

Energie / MJ	0,768 [*]	1,024
Spannung / kV		40
Strom / MA	1,55	1,8
Induktivität / nH	12,2	11,0
Widerstand / mΩ	0,34	0,27
Kapazität / μF	960	1280
Frequenz / kHz	7,2	6,3
Hauptspule L _{sp} /nH		569
R _{sp} /mΩ		0,037
Crowbarzeitkonstante/μs		>1500
Energie pro Schalter/kJ	6	8
Einheitenzahl		128

*Bei der Inbetriebnahme wird jede Kondensatoreinheit zunächst mit 3 Kondensatoren TX20/40-2 kJ bestückt; die Gestelle lassen eine Erweiterung auf 4 Kondensatoren zu.

1.1.2 500 kV Theta Pinch

(G. Herppich, W. Jakobus, G. Klement, G. Kaspar, A. Knobloch, R.C. Kunze, R. Süß, F. Wesner)

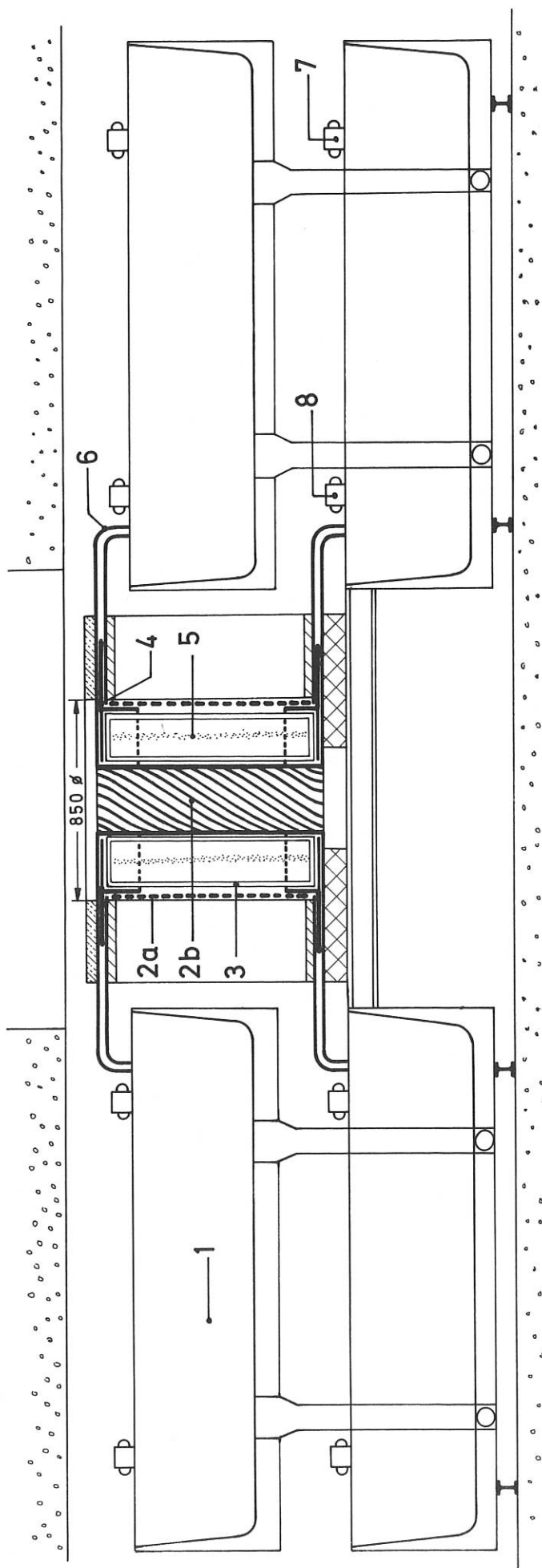
Die Inbetriebnahme der Anlage war im Februar 1972 beendet und die Anlage konnte dem Benutzer übergeben werden. (Technische Daten siehe Jahresbericht 1971). Während des Berichtszeitraumes wurden verschiedene Entwürfe für einen Umbau auf eine 3 m Spule und einen Umbau auf ein Torusexperiment vorgelegt (siehe 250 kV-Belt Pinch).

1.1.3 250 kV-Belt Pinch

(E. Breit, G. Herppich, A. Knobloch, R.C. Kunze, E. van Mark, G. Müller, R. Süß, F. Werner, G. Wulff)

Die konstruktive Ausführung für den geplanten Umbau des linearen Experiments in ein Belt Pinch-Experiment wurde im wesentlichen geklärt. Die Fertigung wird voraussichtlich im Februar 1973 anlaufen. Zur Dimensionierung und konstruktiven Ausführung der toroidalen Spule einschließlich Kollektor waren verschiedene Hochspannungsversuche notwendig. Im elektrolytischen Trog wurde die Stromverteilung für verschiedene Kollektorgeometrien hinsichtlich einer gleichmäßigen Einströmung im Spulenbereich ermittelt. Einige der automatisch aufgezeichneten Feldbilder sind in dem Bericht IPP 4/74 wiedergegeben.

Die Abb. 6 zeigt in schematischer Darstellung den bereits vorhandenen Energiespeicher (Blumleinleitungen) mit dem neuen Verbraucher.



- | | |
|--------------------------------|------------------------|
| 1 Blumleinleitung | 4 Isolierteil |
| 2 Belt-Pinch Spule $h=1100$ mm | 5 Plasma |
| a äußere Wendel | 6 Bandleiter |
| b innere Wendel | 7 Startfunkenstrecke |
| 3 Glasgefäß | 8 Crowbarfunkenstrecke |

Abb. 6 250kV Belt - Pinch Experiment

Spulendaten: $D_a = 816 \text{ mm}$
 $D_i = 412 \text{ mm}$
 $h = 1105 \text{ mm}$
 $B_{\text{max}} \sim 5 \text{ kG}$

Die Spule selbst besteht aus einer 36-fach unterteilten Innen- und Außenwendel. Gleichzeitig mit dem Umbau der Anlage in ein toroidales Experiment sollen die Blumleinleitungen mit Crowbarschaltern ausgerüstet werden. Ein Testkreis zur Erprobung der Crowbarfunkenstrecken wurde aus Anlagenteilen des ehemaligen "Minimax-Experiments" erstellt.

Nachdem zuerst die Thetapinchspule des Experiments mit einem passiven Crowbar ausgerüstet werden sollte, wobei die technische Schwierigkeit in einer genügend niederinduktiven Crowbarfunkenstrecke zu sehen war, ist bei der höherinduktiven Beltpinchspule eine maximale Spannung von 240 kV an einer Spule ohne Plasma zu erwarten, sodaß hier die Spannungsbeanspruchung und der Bedarf an entsprechenden Triggergeneratoren samt Kabel und Beschaltungskapazitäten entscheidend ist.

Gegenüber den bisherigen Crowbareinrichtungen sind beim Crowbar des 250 kV Beltpinches schärfste Anforderungen an den Jitter des an der simultan zu zündenden Mittelelektrode auftretenden Triggerpulses zu stellen. Dieser Jitter ist nicht nur entscheidend für die Reproduzierbarkeit des Crowbarstromverlaufs, sondern wegen des hohen du/dt der Spulenspannung ($\sim 3 \text{ kV/ns}$) auch für die Unsymmetrie der Zündfeldstärken zur Erd- bzw. Hochspannungselektrode von großer Bedeutung.

Die bisher als Minimax bezeichnete Experimentieranlage wurde im Bereich der Gruppe Hochspannungstechnik aufgebaut und mit einem neuen, dem Beltpinch entsprechenden Verbraucher ausgerüstet. Als Crowbarfunkenstrecke wurde nach einigen Vorversuchen die bereits entwickelte Mehrkanalstartfunkenstrecke mit symmetrischer Elektrodeneinstellung verwendet und über einen Bandleiteranschluß unter Wasser an die Spule geschaltet. Mit dieser Experimentieranlage wurden Spulenspannungen bis zu 135 kV erreicht.

Um das hohe du/dt der Verbraucherspannung in der Nähe des Crowbarzeitpunktes zur Triggerung auszunutzen, wurde eine Triggerkapazität über eine parallel zur Verbraucherspule liegende Induktivität resonant geladen (Abb. 7). Mit dieser Anordnung gelang ohne Triggergenerator simultane Zündung der Mittelelektrode und durch Verstellen des Drucks in der Crowbarstrecke konnte so in einem kleinen Zeitbereich ein reproduzierbarer Crowbarstromverlauf erreicht werden (Abb. 8). Da im Plasmaexperiment das Plasma auf den Verlauf der Spulenspannung zurückwirkt, wäre jedoch eine zeitlich einstellbare, unabhängige Crowbartriggerung wünschenswerter. Versuche mit dem bisher zur Starttriggerung eingesetzten Steilwellengenerator ergaben reproduzierbaren Crowbar, wenn der Jitter der Crowbartriggerung klein ($\sim 10 \text{ ns}$) und das Verhältnis von Crowbartriggerspannung zu Spulenspannung 1,5 : 1 ist. Die Entwicklung eines Triggergenerators im 250 kV Bereich und von entsprechenden Beschaltungskapazitäten ist im Planungsstadium.

1.1.4 ISAR T1

(E. Breit, F. Werner)

Die toroidale Stellaratorkonfiguration ISAR T1 wurde Mitte des Jahres durch eine $l=0$ Komponente erweitert. Zu diesem Zweck wurden kurze massive Halbzylinder aus Kupfer an der Torusinnen-seite in die Spule isoliert eingesetzt. Nachdem die Wirkung dieser Bump-Einsätze zunächst in einem Quadranten getestet wurde, erfolgte zusammen mit dem Einbau eines neuen Entladungsgefäßes die Bestückung der gesamten Torusspule. Parallel zu diesen Arbeiten wurden die

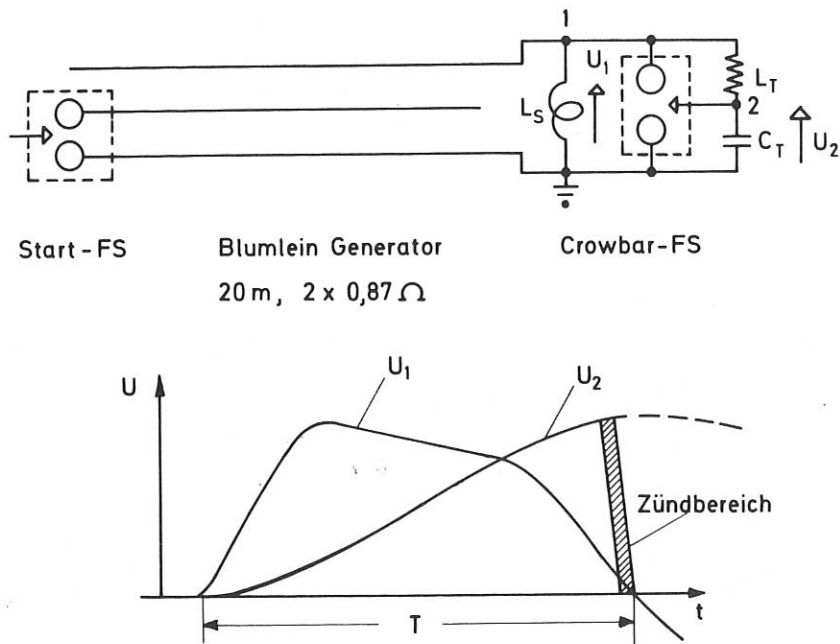


Abb. 7: Prinzipschaltbild für Crowbartriggerung mit Serienschwingkreis

L_S Spuleninduktivität 600 nH, L_T Stoßladeinduktivität 95 μ H für Triggerkapazität $C_T = 195$ pF. $\pi \cdot \sqrt{L_T \cdot C_T} \sim T$

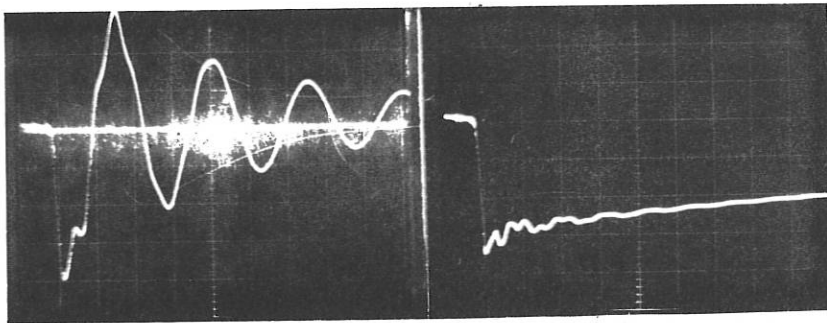


Abb. 8: Strom in der Verbraucherspule mit (rechts) und ohne (links) Crowbar. Stoßladespannung am Blumlein Generator 60 kV, Spuleninduktivität 600 nH. 1 μ s/Div; 7 kA/Div.

Herstellungsmöglichkeiten einer helischen Torusspule untersucht. Als praktikabel auch hinsichtlich des Kosten- und Zeitaufwandes erwies sich eine Version, bei der die helische Innenkontur durch in die vorhandene Torusspule eingesetzte Leichtmetallgußteile hergestellt wird. Zu Kontaktierungstestzwecken wurden einige dieser helischen Einsätze gegossen und in die vorhandenen linearen ISAR 1-Spulen eingebaut.

1.1.5 ISAR II

(G. Herppich, G. Kaspar, A. Knobloch)

Die Fertigung einer Spule mit größerem Durchmesser (200 mm) einschließlich Kollektor wurde abgeschlossen. Der Montagebeginn für den Umbau der Anlage wurde vom Benutzer auf unbestimmte Zeit verschoben.

1.2 TOKAMAK-EXPERIMENT PULSATOR I¹

(J. Bäumlner, J. Gernhardt, G. Herppich, W. Jakobus, F. Kerl, A. Knobloch, H. Lohnert, Ch. Ludescher, G. Nützel, R. Pöhlchen, G. Roos, R. Scherzer)

Die erste Hälfte des Berichtszeitraumes war im wesentlichen ausgefüllt mit der Fertigung der Transformator-, der Korrektur- und Kompensationswicklungen sowie dem Bau von Montagevorrichtungen. Nach Fertigstellung der Wicklungen wurden diese zusammen mit einem Plasmasimulator zur Ausmessung der Streufelder in den Transformator eingebaut. Nach Abschluß der Streufeldmessungen im Sommer des Jahres wurde unverzüglich mit der Endmontage der Transformator- und Zusatzwicklungen in die Gerüstplatten begonnen. Parallel hierzu erfolgte die Montage des Torus einschließlich des Auffädels der Hauptfeldspulen auf den Torus durch die Abt. E3. Im Herbst des Jahres wurden Torus und Wicklungsgerüst zu einer kompletten Einheit zusammengebaut und einer Endprüfung unterworfen. Anfang Dezember konnte der komplette Torus in den Transformator Kern gehoben werden. Am Jahresende war die Fertigung und Montage im wesentlichen abgeschlossen, sodaß die Inbetriebnahme Anfang 1973 erfolgen kann. (Wegen einer Beschreibung des prinzipiellen Aufbaus vom Pulsator I siehe IPP Jahresbericht 1970).

1.2.1 Spulen

1.2.1.1 Hauptfeldwicklung

Durch die Erweiterung der Stromversorgung im Institut stehen ab 1.4.74 statt wie bisher 30 kA nunmehr 45 kA zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde untersucht, ob die für 29 kA (28 kG) dimensionierten Hauptfeldspulen auch mit 45 kA (43 kG) belastet werden dürfen. Wie Abnahmetests an einzelnen Spulen zeigten, bestehen von der elektrischen Beanspruchung her keine Bedenken. Im Verband von 48 Spulen, torusförmig angeordnet, steigt jedoch die Zentripetalkraft von ca. 10 to auf etwa 24 to. Dadurch wurde es erforderlich, den Hartgeweb-Halterahmen durch eine Stahlkonstruktion zu verstärken. Die so ertüchtigten Spulen wurden montiert.

Daten:	Innendurchmesser	450 mm
	Außenabmessungen	680 mm x 800 mm
	mittl. Spulenbreite	50 mm
	max. Strom	45 kA
	elektr. Widerstand (48 Spulen)	19,5 m Ω

¹Allgeyer, R., Bäumlner, G., Gernhardt, J., Herppich, G., Jakobus, W., Kerl, F., Klüber, O., Knobloch, A., Lohnert, H., Ludescher, Ch., Pöhlchen, R., Roos, H.: Proc. 7th Symp. on Fusion Reactor Technology, Grenoble, October 1972.

1.2.1.2 Transformator- und Vertikalfeldwicklungen

Die übrigen Wicklungen (Induktionswicklung, Streufeldkompensationswicklung, äußere Vertikalfeldwicklung und Hauptfeldkorrekturwicklung) wurden fertiggestellt und geprüft. Das Isolationsmaterial der Spulen und Verbindungsschienen war im wesentlichen Hostaphan. An einigen kritischen Stellen wurden Polyäthylenformteile angefertigt, unzugängliche Stellen wurden mit Siliconkautschuk vergossen. Die Stoßprüfung der Wicklungen erfolgte entsprechend 1,5 kV Windungsspannung und mit einem dem Betriebsfall entsprechenden Zeitprogramm.

Weiter wurde eine Gleichspannungsprüfung der verschiedenen Wicklungen gegen das Gerüst, wieder mit einem Sicherheitszuschlag, vorgenommen.

1.2.1.3 Feld- und Kräfteberechnungen

Zwei für die Berechnung toroidaler Spulensysteme mit Einzelspulen homogener Stromdichte entwickelte Computer-Programme wurden eigens für das aus Scheibenspulen bestehende Spulensystem des Pulsator I umgeschrieben:

1. Programm zur Berechnung des Hauptmagnetfeldes (Feldstärkekomponenten, Feldlinien) unter Berücksichtigung der realen räumlichen Stromverteilung, wie es für exakte Ripple-Berechnungen unerlässlich ist.

2. Programm zur Berechnung der infolge des resultierenden Hauptmagnetfeldes auf die Hauptfeldspulen wirkenden Lorentzkräfte (resultierende Kräfte, Kraftdichtefeld).

Beide Programme wurden für die Berechnung der genannten Größen des Pulsator 1 benutzt, Programm 1 für zahlreiche unterschiedliche Erregungszustände des Spulensystems.

1.2.2 Energiespeicher

1.2.2.1 Induktionsfeldbatterie

Die beiden Anstiegsbatterien und die Laufzeitkette sind fertig montiert und verschaltet. Alle 38 Einzelketten liegen parallel, hierbei hat die Anlage den geforderten Wellenwiderstand von $Z = 13 \text{ m}\Omega$. Zur Anpassung an höhere Plasmawiderstände lassen sich durch einfaches Umklemmen die Werte $Z = 56; 125; 500 \text{ m}\Omega$ einstellen. Wegen der Serienschaltung wird hierbei die Isolation der obersten Kettenbausteine mit max. 2,2 kV gegen Masse beansprucht. Alle Bausteine wurden deshalb mit 8 kV 3 Minuten lang gegen das Traggestell geprüft.

Messungen:

- a) Anstiegsbatterie 1: $C = 448 \text{ }\mu\text{F}$; $U_O = 18 \text{ kV}$; $L = 125 \text{ }\mu\text{H}$; $J = 33,5 \text{ kA}$; $f = 665 \text{ Hz}$
 b) Anstiegsbatterie 2: $C = 3,09 \text{ mF}$; $U_O = 7 \text{ kV}$; $L = 125 \text{ }\mu\text{H}$; $J = 33,6 \text{ kA}$; $f = 247 \text{ Hz}$
 c) Untersuchung der 38 Einzelketten auf einwandfreie Pulsform;
 Anstiegsbatterie: $C = 12,8 \text{ }\mu\text{F}$; $U_A = 17 \text{ kV}$; $f_A = 193 \text{ Hz}$; $T_{A/4} = 1,3 \text{ ms}$
 Verbraucher: $L = 43,5 \text{ mH}$; $R = 450 \text{ m}\Omega$
 Kette: $Z = 500 \text{ m}\Omega$; $U_K = 320 \text{ V}$; $J_K = 320 \text{ A}$; $T_{\text{puls}} = 100 \text{ ms}$
 Nach 100 ms beträgt der Strom ca. 95% des Anfangswertes.

Wegen der Sättigung der Eisendrosseln ist deren Induktivität und damit der Wellenwiderstand der Kette nicht konstant, sondern vom Strom abhängig. Folgende Werte wurden gemessen:

J_{Kette} (A)	320	205	150	105	50
Z_{Kette} (Ω)	0,5	0,73	0,83	0,99	1,16

d) Parallelbetrieb von 8 Ketten

Anstiegsbatterie: $C = 164 \mu\text{F}$; $U_A = 12 \text{ kV}$; $f_A = 222 \text{ Hz}$; $T_{A/4} = 1,2 \text{ ms}$

Verbraucher: $L = 3,65 \text{ mH}$; $R = 41 \text{ m}\Omega$

Kette: $U_K = 320 \text{ V}$

Pulsdauer $T = 100 \text{ ms}$; Konst. Dachstrom $J = 2,9 \text{ kA}$

Nach der Kommutierung, d.h. wenn der von der Anstiegsbatterie gelieferte Verbraucherstrom von der Kette übernommen wird, tritt ein Stromeinbruch auf ca. 90% für ca. 0,5 ms auf. Dämpfungswiderstände von je $0,1\Omega$ parallel zu jeder ersten Drossel in der Kette brachten eine Verbesserung, jedoch keine endgültige Abhilfe. Die Ursache dieser Erscheinung dürfte die Inkonzanz der Drosselinduktivität sein (siehe c).

1.2.2.2 Vorionisierungsbatterie

Zur Vorionisierung des Plasmas wird ein Kondensator $C = 0,5 \mu\text{F}/18 \text{ kV}$ schwingend über ein Ignitron auf die Induktionsfeldwicklung entladen.

1.2.2.3 Entmagnetisierungsbatterie

Zum Löschen des Restmagnetismus im Eisenkern wurde noch eine Entmagnetisierungsbatterie installiert. Ein Kondensator mit $C = 320 \mu\text{F}/2,5 \text{ kV}$ wird mittels Vakuumschalter auf die Entmagnetisierungswicklung, die auf den acht Schenkeln des Trafos verteilt ist, geschaltet.

$$U_0 = 2,5 \text{ kV}$$

$$\hat{J} = 580 \text{ A}$$

$$f = 115 \text{ Hz} \quad 70\% \text{ durchschwingend}$$

$$L_{\text{Verb}} = 6 \text{ mH}$$

1.2.2.4 Stromversorgung für äußeres Vertikalfeld

Zur Versorgung der äußeren Vertikalfeldwicklungen wurde zusammen mit der Industrie ein rotierender 350 kJ-Stoßgenerator montiert und in Betrieb genommen. Zum Schutz des Generators gegen Überspannungen wurde eine Drossel mit 2 mH, $0,1 \text{ m}\Omega$, 6 kA in den Ankerkreis eingeschaltet.

Für die Programmierung des Maschinenstroms wurde ein elektronisches Gerät entwickelt, das die Erregung des Generators regelt. Damit soll einerseits der eingestellte Stoßstrom möglichst rasch erreicht werden, andererseits soll der Generatorstrom in den Pausen möglichst genau auf Null abfallen. Zu diesem Zweck liefert das Steuergerät während der Impulspausen einen Strom in die Feldwicklung, der den remanenten Fluß kompensiert.

1.2.2.5 Stromversorgung für die inneren Vertikal- und Stellaratorwicklungen

1) Speicherbatterie

Die benötigte Energie wird in einer Batterie aus Elektrolytkondensatoren gespeichert. Das Speichervermögen ist ca. 1 MJ bei 200 V Ladespannung. Aus Sicherheitsgründen ist die Batterie in 100 Gruppen unterteilt. Jeder dieser Baugruppen sind 2 Thyristoren zugeordnet, von denen jeweils einer die Batterie über den elektronischen Regler mit der Vertikalfeldspule verbindet, während der andere nach dem Ende des Nutzpulses bzw. im Störungsfalle für die schnelle Entladung der Batterie über einen Widerstand dient. Nach Erprobung einer Mustergruppe zusammen mit dem zugehörigen Regler wurden alle Einheiten angefertigt und in ein gemeinsames Gestell eingebaut.

2) Stromregler

Der Regler für das Stromprogramm (bis 40 kA bei 200 V Anschlußspannung) ist ebenfalls in 100 Baugruppen unterteilt, die jeweils auf eine gemeinsame Kühlplatte montiert sind. Mit einer dieser Baugruppen wurde ein Dauerversuch durchgeführt. Dabei wurden Kondensatorbatterie und Regler einer erhöhten Belastung ausgesetzt: Die Ladespannung war überhöht, die Ströme wurden in einem weiten Bereich variiert und der Lastwiderstand kleiner gehalten als in der Praxis vorgesehen. Ferner wurde die Schußfolge verdoppelt. Nach 40.000 Entladungen waren zwar zahlreiche Transistoren ausgefallen (wobei sich die unterschiedliche Qualität einzelner Fabrikate zeigte), jedoch blieb das Reglerverhalten stets intakt. Aufgrund dieses positiven Ergebnisses wurde die Serienfertigung der 100 Regler aufgenommen und bis zum Jahreswechsel etwa 40 Stück fertiggestellt.

3) Zusatzgeräte

Die notwendigen Hilfsgeräte, wie Steuergeräte, Triggereinrichtung, Hilfsspannungsversorgungen, Überwachungsgeräte wurden größtenteils fertiggestellt und geprüft.

1.2.3 Steuerung und Ladung

Durch die Streufeldmessung im Juni war es nötig, mit einer provisorischen Ladeeinrichtung den Betrieb kurzzeitig aufzunehmen. Im September konnte mit der planmäßigen Installation von Lade- und Netzgeräten, Anlassern und den dazugehörigen Steuerungen einschließlich der Zentralsteuerung begonnen werden. Der Probetrieb wurde Ende November aufgenommen. Die völlige Fertigstellung der Ladeeinrichtung ist nach Abschluß vakuumtechnischer Arbeiten zu erwarten.

Durch Kopplung der zentralen Steuereinheit mit einem Digitalrechner soll später ein automatischer Experimentierbetrieb möglich werden.

1.2.4 Gaseinlaßsystem

Zum definierten Gaseinlaß wurde ein ausheizbares Ventil mit pneumatischer Betätigung gebaut. In Verbindung mit einem Vorratsbehälter, in dem ein Gasdruck von 1 bzw. 10 Torr aufrechterhalten wird, können in das Entladungsgefäß periodisch Gasmengen eingelassen werden, die in diesem wahlweise Drucke von 10^{-2} bis 10^{-5} Torr erzeugen.

1.3 Magnetfelder

1.3.1 Stelleratorexperiment W6 - levitierter Multipol

(W. Amenda, A. Kellerbauer, P. Krüger, H. Lohnert, A. Martinelli, S.L. Wipf*,
in Zusammenarbeit mit Abt. 2)

Die Arbeiten zum Bau der beiden levitierten supraleitenden Ringe wurden fortgeführt.

1.3.1.1 Materialuntersuchungen

Mit der im Jahresbericht 1971, S. 196, erwähnten Meßanordnung (IPP-Berichte 4/84 und 4/95) wurden im Hinblick auf die Entwicklung eines thermischen Schalters Messungen der kritischen Werte I_c, H_c, T_c an einem unstabilierten Nb_3Sn -Band durchgeführt.

Ähnliche Messungen an V_3Ga -Bändern ergaben, daß der kritische Strom mit steigender Temperatur bis zum kritischen Wert $T_c = 14,5$ K etwa linear abnimmt. Bei 4,2 K entsprechen die kritischen Werte den Herstellerangaben.

*bis zum 1.4.72 in Abt. Technik

1.3.1.2 Probespulen

Durch Beiwickeln von 50 μ Al-Band konnte die starke Degradation, die 1971 an den Probespulen festgestellt worden war (Jahresbericht 1971, S. 196), besonders oberhalb von ca. 11 K reduziert werden. Das benötigte maximale Radialfeld kann dadurch mit weniger supraleitendem Material erreicht werden (Vgl. Abt. 2). Weiter wurde das thermische Verhalten beim Auftreten von örtlichen Wärmeimpulsen getestet. Zu diesem Zweck wurden flache Heizelemente in die Spulen mit eingewickelt. Durch definierte Impulse konnten so örtlich begrenzte Normalübergänge erzeugt werden. Für die theoretischen Betrachtungen wurde eine Modellvorstellung entwickelt und ein Parameter ξ als Maß für die kryogenische Stabilität einer Spule eingeführt^{1,2}:

$$\xi = \frac{T_i - T_o}{j^2 \varrho}$$

Dabei ist: T_o Umgebungstemperatur in der Spule
 T_i kritische Temperatur des Supraleiters
 j kritischer Strom
 ϱ Spezifischer Widerstand des stabilisierenden Kupfers

$\xi \leq 12,5 \text{ Kcm}^3/\text{W}$ Die Spule ist vollkommen instabil.
 $12,5 \text{ Kcm}^3/\text{W} \leq \xi \leq 33 \text{ Kcm}^3/\text{W}$ Ein örtlich begrenzter Normalübergang in der Spule kann sich nicht ausdehnen. Die Spule bleibt jedoch normaleitend.
 $33 \text{ Kcm}^3/\text{W} \leq \xi \leq 50 \text{ Kcm}^3/\text{W}$ Die normaleitend gewordene Zone kühlt sich wieder ab und die Spule wird wieder supraleitend.
 $\xi \geq 50 \text{ Kcm}^3/\text{W}$ Die Spule bleibt stabil supraleitend.

1.3.1.3 Spulen

Die beiden supraleitenden Ringe wurden gewickelt (Abb. 9). Der äußere Ring hat einen Innendurchmesser von 114 cm und einen Außendurchmesser von etwa 125 cm und besteht aus

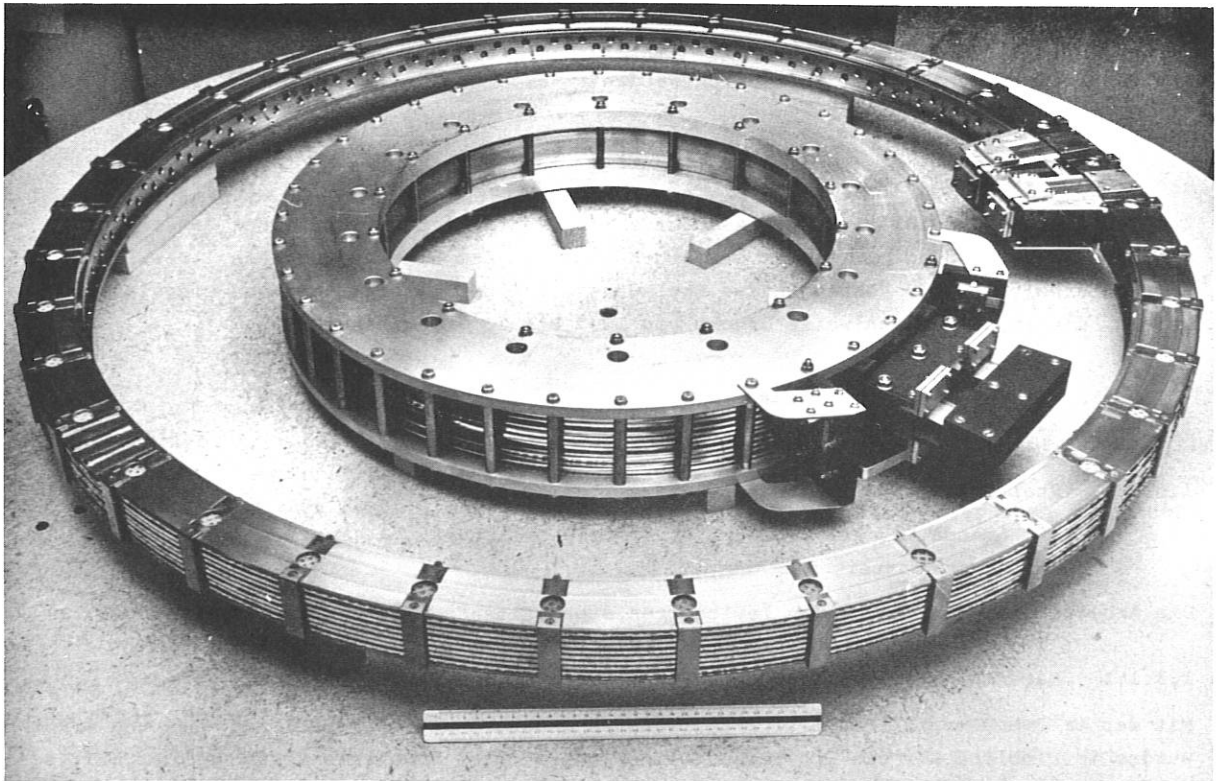


Abb. 9: Stellarator W6; levitierte, supraleitende Ringe

¹F. Rau, H.J. Jaeckel, A.P. Martinelli, and S.L. Wipf, Proceedings of Applied Superconductivity Conference, Annapolis, Maryland, USA, 1972.

²A.P. Martinelli and S.L. Wipf, Proceedings of Applied Superconductivity Conference, Annapolis, Maryland, USA, May 1-3, 1972.

8 Wicklungsscheiben mit insgesamt 1694 Windungen. Der innere Ring mit einem Innendurchmesser von 53 cm und einem Außendurchmesser von 72 cm ist aus 2 äußeren Teilen und einem mittleren Teil aufgebaut. Die gesamte Windungszahl beträgt 3492.

Nach den Erfahrungen bei den Probespulen wurde bei den äußeren Wickeln ein 50 μ m dickes Reinaluminiumband beigewickelt, um die dort durch das hohe Radialfeld auftretenden magnetischen und thermischen Belastungen besser beherrschen zu können. Damit sollte der Strom von 130 A möglich sein, der bei dieser Anordnung zum Erreichen eines maximalen Magnetfeldes von 30 kG erforderlich ist.¹

Die Wickelscheiben wurden in einem Spulenkörper montiert und verschaltet. Drei Prototyp-Schalter² wurden angebaut und die beiden Ringe für einen Test in einem Kryostaten vorbereitet.

Eine Testanlage zur Untersuchung des Übergangswiderstandes eines sich im Vakuum befindlichen Stromkontaktes wurde entwickelt.

1.3.2 Stellarator Experiment WEGA

(H. Kotzowski, H.Lohnert, in Zusammenarbeit mit Abt. 2)

Das toroidale Magnetfeld für das Experiment Wega wird von 40 wassergekühlten Spulen erzeugt, die am Torusumfang gleichmäßig verteilt sind. Das Magnetfeld wurde berechnet, die Spulen (Abb. 10) und das Gerüst konstruiert. Die Zentripetalkräfte von 15 to je Spule werden von einem zentralen Stützring aufgenommen. Zur Durchführung von Spiegelexperimenten ist vorgesehen, eine Spule mit verringertem Strom oder ganz stromlos zu betreiben. Zur Beherrschung der dabei in Umfangsrichtung entstehenden Kräfte von bis zu 15 to werden die Spulen durch Abstandselemente kraftschlüssig gegeneinander abgestützt.

Daten des toroidalen Magneten:

Durchmesser der Torusseele	144 cm
Feldstärke in der Torusseele	24 kG
Pulsstrom bei 0,5 s. Pulsdauer	17 kA
Ohmscher Widerstand	66 m Ω
Gespeicherte Energie	1,45 MWh
Erwärmung pro Puls	8 K
Gesamtinduktivität	29 mH

Daten einer Spule (Vgl. Abb. 10):

Windungszahl einer Spule	13
Kupferprofil	14 x 24 m
Bohrung	5 mm \varnothing
Kupfergewicht einer Spule	80 kg

¹F. Rau, H.J. Jaekel, A.P. Martinelli, and S.L. Wipf, Proceedings of Applied Superconductivity Conference, Annapolis, Maryland, USA, 1972.

²P. Krüger, A.P. Martinelli: ICEC 4 Tagung, Eindhoven, 1972.

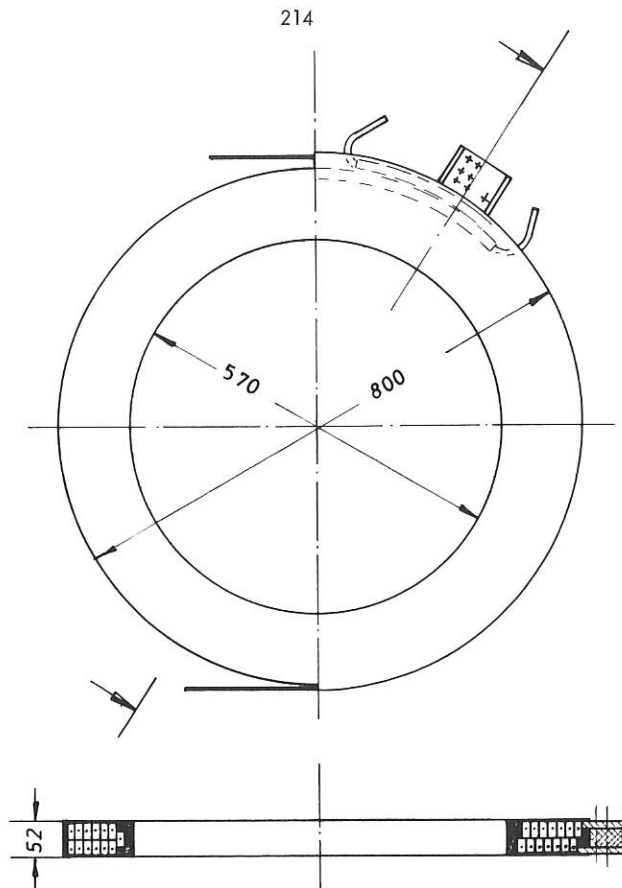


Abb. 10: Stellarator WEGA. Skizze einer Spule.

1.3.3 Wassergekühlte ausheizbare Spule für Polaris

(P. Krüger)

Für das Experiment "Polaris" wurde eine ausheizbare Spule mit Eisenrückschlußjoch (St. 37) entwickelt (Abb. 11). Die Induktion im Spulenmittelpunkt steigt mit dem Strom linear an. Die Wicklung besteht aus 6 elektrisch hintereinandergeschalteten Einzelspulen mit je 19 Windungen. Sie ist mit Kupferrohren ausgeführt, die zum Schutz gegen Korrosion vernickelt sind. Durch die Isolierung mit Teflon-Schrumpfschläuchen konnte eine Wärmefestigkeit von 300°C erreicht werden. Die Wasserkühlkreise der Einzelspulen liegen parallel. Sie sind über Keramikdurchführungen an den Wasserverteiler angeschlossen.

Nennstrom bei normalem Wasserleitungsdruck (ca. 2 l/min): 140 A

Leistung: 3400 W

Induktion: 0,5 T

Abmessungen der Kupferrohre: $D_a = 2,5 \text{ mm}$

$D_i = 1,5 \text{ mm}$

Kupferquerschnitt $3,14 \text{ mm}^2$

Bei Nennstrom ergibt sich eine Stromdichte im Kupfer von $g_{\text{Cu}} = 44,5 \text{ A/mm}^2$. Die Stromdichte über die ganze Wicklung beträgt $g_w = 13 \text{ A/mm}^2$. Der große Unterschied zwischen g_{Cu} und g_w entsteht durch die relativ dickwandigen Schrumpfschläuche.

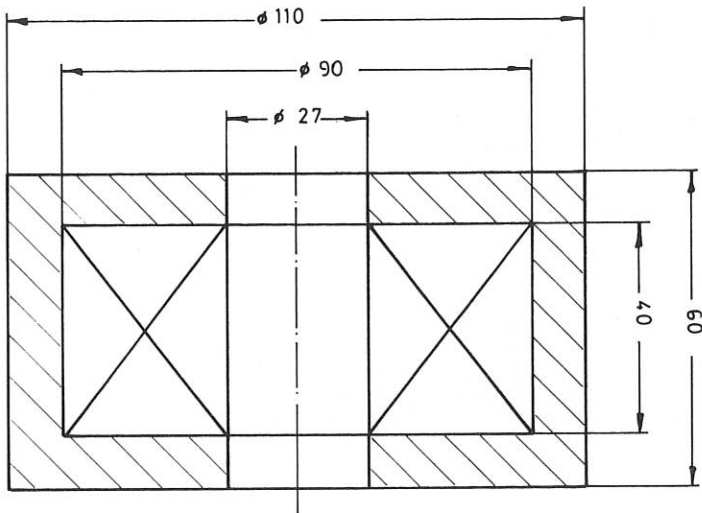


Abb. 11: Wassergekühlte Spule für Polaris

1.4 Kondensatorbatterie mit Start- und Crowbarfunkenstrecken für 1 Hz Schaltfolgefrequenz (Experiment ERA)¹

(W. Ertl, R.-C. Kunze, G. Müller, R. Süß)

Die im Jahresbericht 1971, S. 200, beschriebene Energiespeichereinheit (30 kV, 4 kJ) für 1 Hz Schaltfolgefrequenz wurde in einer Serie von 40 Stück gefertigt, montiert und in Zusammenarbeit mit der Abt. Relativistische Plasmen zu einer Kondensatorbatterie (30 kV, 160 kJ, 25 kHz) zusammengestellt. Die Hauptabmessungen der Schaltereinheit sind 160 x 16 x 3 cm. Das Gesamtgewicht beträgt ca. 30 kp und die Wärmekapazität ca. 15 kJ/°C. Abb. 12 zeigt Ergebnisse von Erwärmungsmessungen in Abhängigkeit von der Betriebsdauer bei verschiedenen Schaltfolgefrequenzen und bei natürlicher Kühlung. Die Grenzüberetemperatur von ca. 60°C erlaubt es, Isolationsmaterial mit niedriger Wärmebeständigkeit einzusetzen. Die Kondensatorbatterie und die zugehörigen 12 Triggergeneratoren (vgl. Jahresbericht 1971, S. 231) wurden Mitte des Jahres mit Einzelentladungen in Betrieb genommen. Ein Übersichtsschalbild der Anlage zeigt Abb. 13. Nach anfänglichen Schwierigkeiten, insbesondere mit einem Bauteil, und zwar der hochspannungsfesten Silikonquetschdichtung zur Bandleiterverspannung, arbeitet die Batterie zufriedenstellend. Gegenüber den früheren Vorstellungen wurde zur Abkopplung der Crowbartriggerkreise eine einfache Isolierfunkenstrecke eingesetzt. Diese verhindert eine Spannungsbeanspruchung zwischen den Mänteln der Crowbartriggerkabel.

Ein Oszillogramm des Stroms in der Spule zeigt Abb. 14. Die Crowbarwelligkeit beträgt 2,5% und die Abfallzeitkonstante 400 µs. Diese Daten stimmen mit den Ergebnissen des 50 kHz Testkreises überein.

¹R. Süß, G. Müller, 7. Symposium on Fusion Technology, Grenoble 1972.

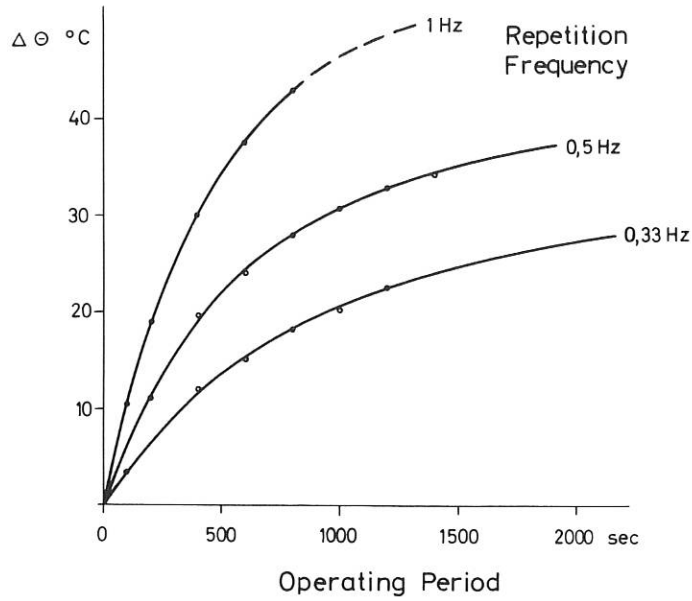


Abb. 12: Erwärmung der 4 kJ-Schaltereinheit.
 Testkreis: 30 kV, 80 kA, 50 kHz

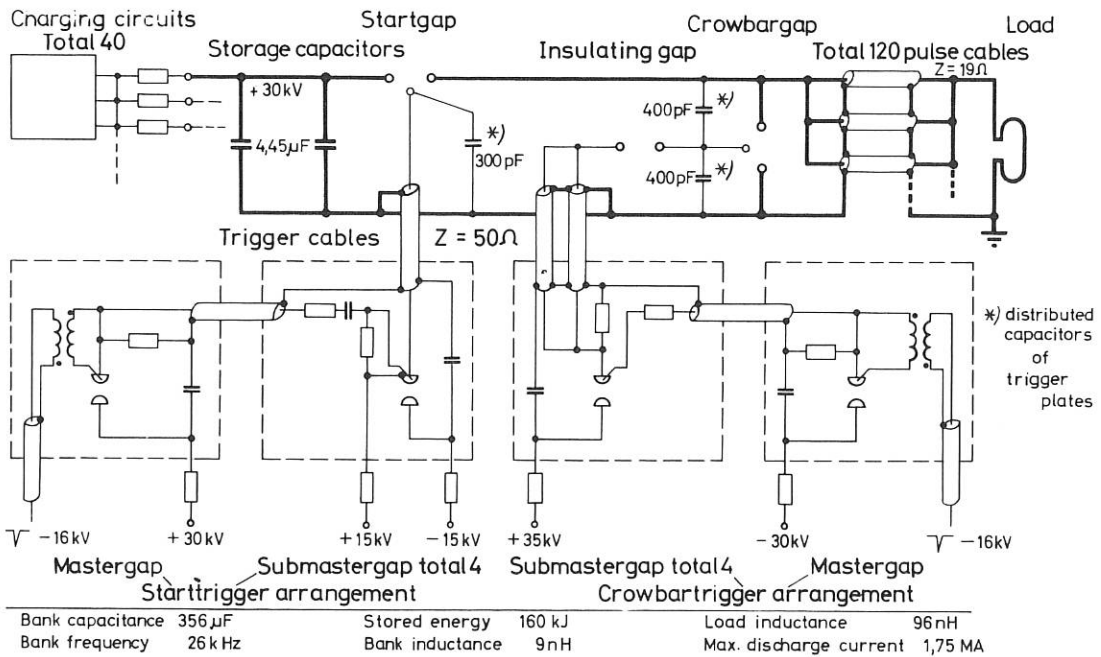


Abb. 13: Übersichtschaltbild der ERA-Kondensatorbatterie

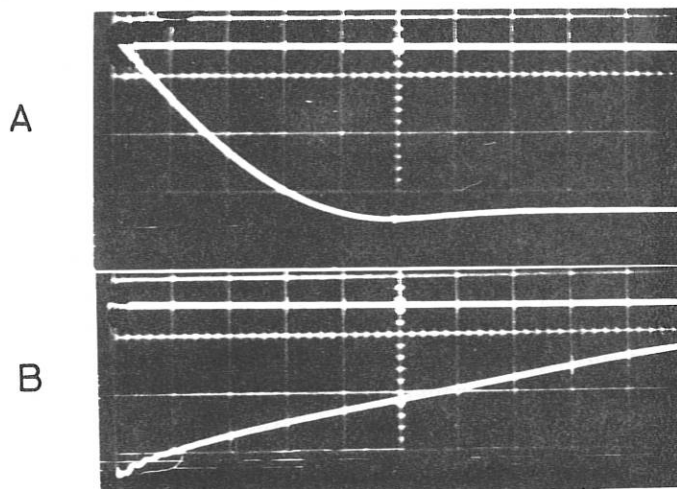


Abb. 14: Strom in der Verbraucherspule

A: 2 $\mu\text{s}/\text{Div.}$, 450 kA/Div.
 B: 50 $\mu\text{s}/\text{Div.}$, 450 kA/Div.

1.5 MJ-Jod-Laser-Kondensatorbatterie

(G. Klement, H. Wedler)

Das technische Konzept der 1 MJ-Jod-Laser-Batterie wird unter Abteilung Experimentelle Physik 4, Punkt 4.2.3 "kJ-Jodlaser" beschrieben.

2. Forschungsarbeiten über Grundlagen der Plasmatechnik

2.1 Hochspannungstechnische Arbeiten

2.1.1 Messungen über Zündbedingungen von nichtentkoppelten, parallelen Funken ¹⁾

(G. Müller, R. Süß)

Bei einigen Anwendungen getriggertter Funkenstrecken ist die Zündung von parallelen transienten Bögen erforderlich, um die Schalterinduktivität und den Bogenwiderstand zu erniedrigen und eine gleichmäßige Elektrodenerosion zu erreichen. Um Einblick in die Zündbedingungen paralleler Funken zu bekommen, wurden an Teilen einer offenen Crowbarfunkenstrecke (Abb. 15) Messungen vorgenommen. Bei konstantem Elektrodenabstand wurden die Eigenkapazität der Elektrodenanordnung, die Pulsspannungshöhe und der Pulsspannungsanstieg sowie die Zahl der Zündstellen

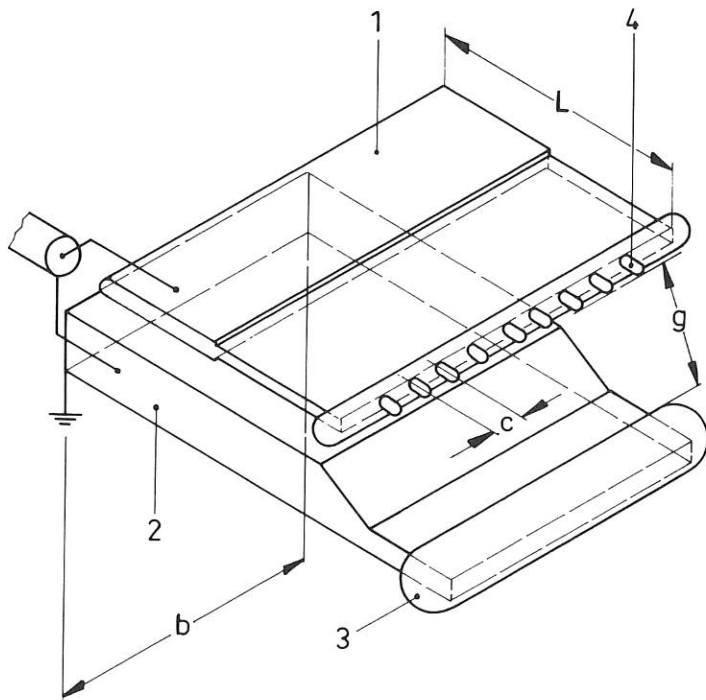


Abb. 15

Aufbau der Versuchsfunkenstrecke

- 1, 2 Elektrodenplatte
- 3 Elektrode (40 mm ϕ)
- 4 Hochspannungselektrode mit bis zu 9 Zündstellen (8 mm ϕ)

Abmessungen: L = 200 mm

b = 160 mm

c = 20 mm

g = 10 mm

variiert. Die Pulsspannung zwischen den Elektroden wurde gemessen und die Zahl der parallelen Funken visuell und mit einer Bildwandlerkamera beobachtet. Abb. 16 zeigt z.B. die Häufigkeitsverteilung der Zahl der Funken bei 25 aufeinanderfolgenden Entladungen in einem Testkreis mit hoher niederinduktiver Eigenkapazität zwischen Hochspannungs- und Erdelektrode und 8 Zündstellen. Als maximale Zahl paralleler Funken sind hier 7 und als durchschnittliche Zahl 5,2 zu erkennen. Bei Testkreisen mit niedriger Eigenkapazität waren auch mit verschiedenen, verbesserten Nebenbedingungen höchstens zwei, in der Regel jedoch nur ein Funken zu beobachten. Die Untersuchungen mit dem Bildwandler zeigten, daß unabhängig von den Versuchsparametern kurz nach Erreichen der statischen Durchbruchspannung von allen Zündstellen Leuchterscheinungen ausgehen, die aber nur bei den Testkreisen mit hoher niederinduktiver Eigenkapazität zur Ausbildung paralleler Funken führen.

¹⁾ G. Müller, R. Süß: 2. International Conference on Gas Discharges, London, Sept. 1972.

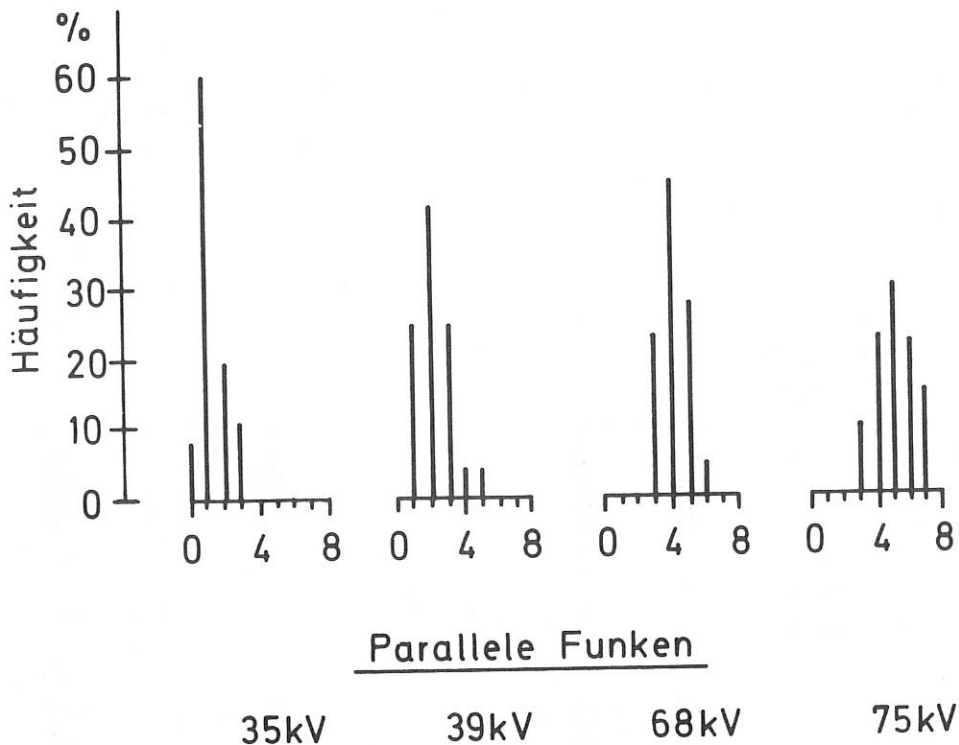


Abb. 16 Häufigkeitsverteilung der Zahl paralleler Funken bei steigender Pulsspannungsamplitude (Angaben für Spannung am offenen Kabel)
 Testkreis: hohe niederinduktive Eigenkapazität (580 pF, ~ 10 nH), 8 Zündstellen, 25 Entladungen

Trotz der relativ geringen Überspannung des Pulsdurchbruchs entsprechend dem mäßigen Anstieg der Pulsspannung (50 ns) ist die Zeitstreuung des Durchbruchs bei hoher niederinduktiver Eigenkapazität extrem klein. Um eine endgültige Erklärung hierfür zu finden, sollen die Untersuchungen weitergeführt werden.

2.1.2 Kompatibles Schaltersystem für kapazitive Energiespeicher ¹⁾

(G. Klement, H. Wedler)

Die Entwicklungsarbeiten am bereits im Jahresbericht 1971, S. 203 - 206, vorgestellten Schaltersystem wurden abgeschlossen. In diesem Rahmen wurde der Jitter des Startschalters in Abhängigkeit von verschiedenen Triggervarianten untersucht. Für die einfachste Triggerung ohne zusätzliche Beschalungselemente wurde bei einer 2:1-Elektrodeneinstellung im Bereich $\frac{\text{Arbeitsspannung}}{\text{Durchbruchspannung}} > 0,4$ ein Jitter ± 10 nsec gemessen. Erfahrungsgemäß reicht diese Streubreite für viele Anwendungsfälle aus. Werden höhere Anforderungen an den Startschalter gestellt, kann der Triggerbereich bis auf 20 % der stat. Durchbruchspannung (swinging cascade mode) ausgedehnt werden.

Der im Vergleich zum Startschalter wesentlich problematischere Crowbarschalter wurde eingehend untersucht. Eine gleichzeitige Zündung des Crowbarschalters im Spannungsnulldurchgang läßt sich auch ohne zusätzliche Maßnahmen realisieren. Allerdings ist der Schalter dann sehr anfällig gegenüber auftretenden Schaltungsenauigkeiten bzw. Abstandsunauigkeiten. Bei Vorhanden-

¹⁾ G. Klement, H. Wedler: Proc. 7th Symposium on Fusion Technology, Grenoble 1972.

sein solcher Unsymmetrien treten beträchtliche Zeitverzögerungen zwischen Triggerzeitpunkt und Stromübernahme durch den Crowbarschalter auf. Dies führt dann je nach Entladefrequenz zu einer recht beträchtlichen Erhöhung der Welligkeit. Es wurden insgesamt 6 verschiedene Triggervarianten untersucht. Die drei wesentlichsten sind der Abb.17 zu entnehmen. In Abb. 18 sind die gemessenen Zündverzugszeiten aufgetragen. Mit Schaltung C wird der Strom praktisch unverzögert in einem weiten Bereich um den Spannungsnulldurchgang übernommen. Mit Schaltung B sind die Verzugszeiten teilweise beträchtlich. Diese Messungen und die bereits früher durchgeführten Tests beweisen, daß mit der Triggervariante C ein sehr zuverlässiger Crowbarschalter mit geringer Induktivität (35 nH) zur Verfügung steht.

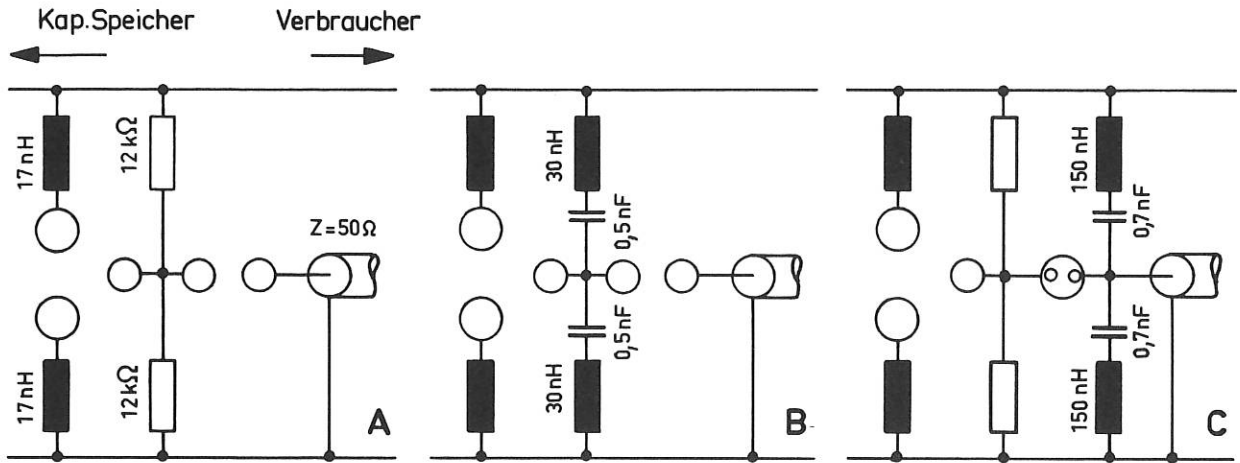


Abb. 17 Verschiedene Triggervarianten der Crowbar-Funkenstrecke mit simultaner Zündung. Statische Durchbruchspannung der Funkenstrecke: 55 kV

Variante A

Ohne zusätzliche Beschaltung.
 Pulssteilheit am Kabelende:
 1 kV/ns; Pulssteilheit an
 der Mittelelektrode: 1,5 kV/ns;
 Pulsdurchbruchspannung: 30 kV;
 Stoßfaktor: 1,4.

Variante B

Mit erhöhter Kapazität der
 Mittelelektrode.
 Pulssteilheit an der Mittel-
 elektrode: 0,8 kV/ns; Puls-
 durchbruchspannung: 30 kV;
 Stoßfaktor: 1,4.

Variante C

Mit zusätzlicher Kapazität und
 Druck-Aufsteilfunkenstrecke.
 Druckfunkenstrecke: 8 atü, 3 mm;
 Pulssteilheit an der Mittel-
 elektrode: 100 kV/ns; Puls-
 durchbruchspannung: 90 kV;
 Stoßfaktor: 4.

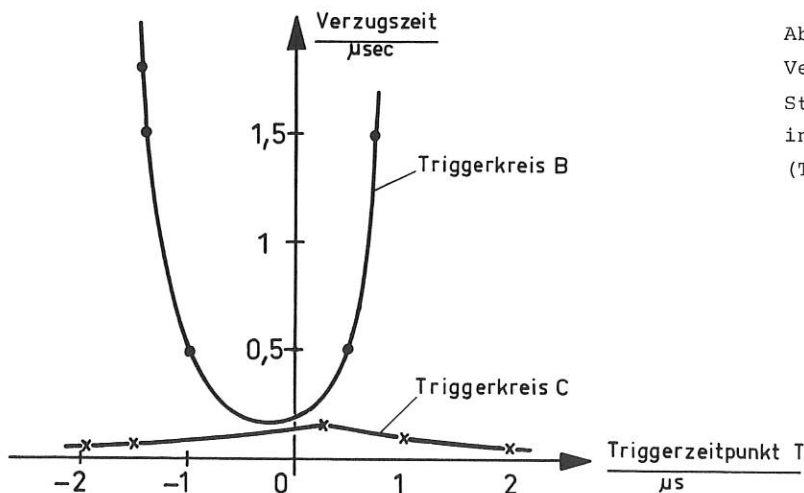


Abb. 18 Verzugszeit zwischen Triggerpuls und Stromübernahme im Crowbarschalter in Abhängigkeit vom Triggerzeitpunkt (T = 0: Spannungsnulldurchgang)

2.1.3 Eignungsuntersuchungen an Hochstromanlagen

(J. Gruber, A. Knobloch, F. Werner)

Die Montage an der 90-kJ-Testbatterie wurde fortgeführt. Terminverzögerungen ergaben sich durch extern gefertigte Kollektorteile. Ab Mitte 1972 stand 1/3 der Anlage für Tests zur Verfügung. Es wurden einige hundert Entladungen bei 40 kV in eine niederinduktive Lastspule durchgeführt. Die Induktivitätsbestimmung zeigt, daß Start- und Crowbarschalter (Mehrkanaalsystem) nicht auf allen 4 Kanälen/Schalter zündeten. Für die Triggerung stand nur das für ISAR X vorgesehene Triggersystem (40-kV-Start-, 80-kV-Marxgenerator mit offenen Funkenstrecken) zur Verfügung. Eine Steilwellentriggerung ist zur Zeit im Bau. Bei Schaltströmen von 450 kA/Schalter trat nach ca. 100 Entladungen eine Zerstörung der Schalterzwischenisolation (Nylon) auf. Durch Einsatz neuer Kunststoffe soll die Funkenstrecke verbessert werden. Die Anlage wurde u.a. zum Stromtest für Lötstellen an Wicklungsteilen zur Belt-Pinch-Spule eingesetzt.

2.2 Laser

2.2.1 Elektronenkanone zur Anregung eines HF-Lasers

(F. Wesner in Zusammenarbeit mit R.W.F. Groß, Abt. E4; siehe auch Abteilung E4, Chemische Laser)

Zur Anregung eines HF-Lasers in einer elektronenstrahlgesteuerten Entladung wurde eine Elektronenkanone gebaut (Abb. 19), die induktivitätsarm an eine Blumlein-Bandleiter-Anordnung

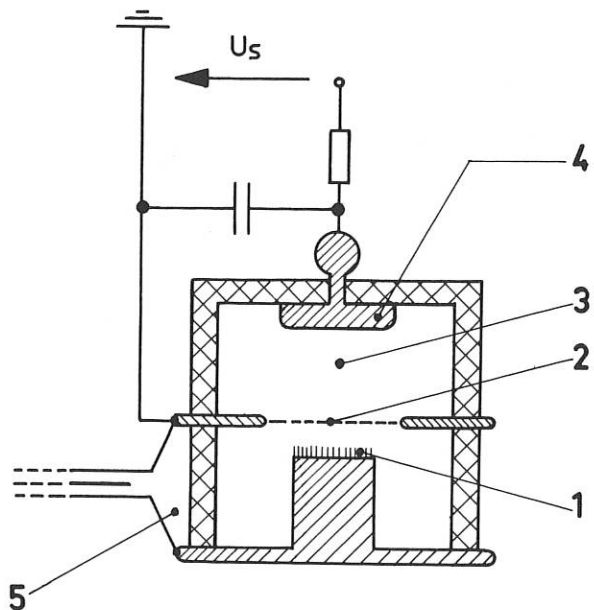


Abb. 19

Querschnitt durch Elektronenkanone und Laserkammer

- 1 Feldemissionskathode
- 2 Lenard-Fenster
- 3 Laserkammer
- 4 Elektrode zum Anlegen der Spannung U_s
- 5 Blumlein-Bandleiter-Anschluß

angeschlossen ist (Jahresbericht 1971, S. 201). Mit einer Feldemissionskathode wird ein großflächiger Elektronenstrahl erzeugt und durch eine Trennfolie aus Aluminium oder Hostaphan in die Laserkammer injiziert. Im SF_6-H_2 -Gemisch der Laserkammer sollen durch den Elektronenstrahl genügend Sekundärelektronen erzeugt werden, um mit Hilfe einer Saugspannung, die unter der Durchschlagsspannung liegt, eine intensive, funkenfreie und homogene Entladung auszulösen und damit hohe Pumpraten zu ermöglichen.

Folgende Werte wurden gemessen:

Spannung an der Elektronenkanone:	120 kV
In die Laserkammer injizierter Elektronenstrom:	5,5 kA
Elektronenstromdichte (auf Kathodenfläche bezogen):	40 A/cm ²
Mittlere Dichte der injizierten Elektronen in der Laserkammer:	2×10^{11} Elektr./cm ³

Durch Anlegen einer Saugspannung an die Laserkammer wird eine Stromverstärkung um den Faktor 2 - 3 erreicht. Den Laser-Output in Abhängigkeit vom Druck zeigt Abb. 20. Er hat dort sein Maximum, wo mit steigendem Druck die Reichweite der Elektronen im Lasergas kleiner wird als der Elektrodenabstand. Der kleine Wert der Stromverstärkung in der Laserkammer deutet darauf hin, daß der Laser-Output durch eine Vergrößerung der Elektronendichte in der Laserkammer wesentlich gesteigert werden kann.

An einer Verbesserung der Anordnung wird gearbeitet.

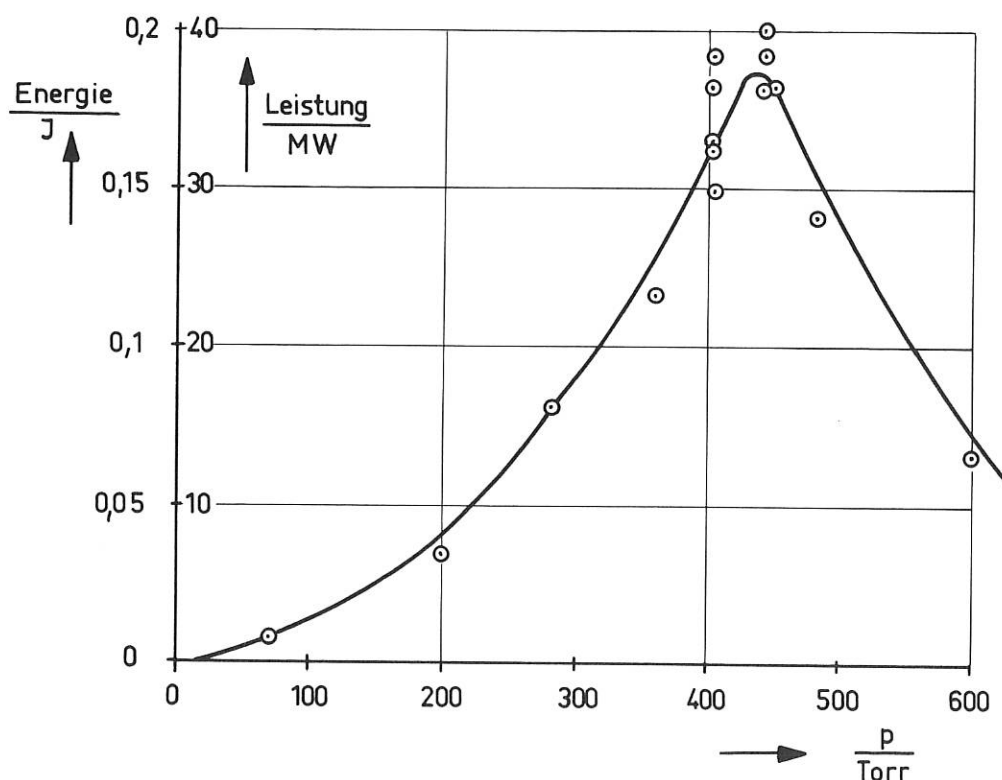


Abb. 20 Energie und Leistung des Lasers in Abhängigkeit vom Druck
Gasmischung: SF₆:H₂ = 11:1

2.2.2 Test und Untersuchung von Xenon-Blitzlampen für den Jodlaser (G. Klement, H. Wedler)

In Zusammenarbeit mit der Abteilung E4 wurden Vorversuche unternommen, um die Belastbarkeit der Lampen, Zuleitungen, Kontakte, Bandleiter und Schalter zu prüfen. Für die Ausnutzung der Anlage und für die auftretenden Scheitelströme ist bei dieser niederinduktiven Anlage der Lampenwiderstand ganz entscheidend. Bei 30 Torr Xenon wurden Strom und Spannung in Abhängig-

keit von der Energie/Lampe (Länge: 60 cm, ϕ außen: 12 mm, ϕ innen: 7 mm, Quarz, Wo-Elektroden) aufgenommen. Nach einem relativ steilen Anstieg (<100 nsec) auf die volle Kondensatorspannung zündet die Lampe, und die Spannung geht auf etwa 70 % zurück. Nach dieser scharfen Spannungsspitze fällt die Spannung cosinusförmig auf Null ab.

Ladespannung U_0 (kV)	Gesamt- energie (kJ)	Energie je Lampe (kJ)	Pulsbreite (μ sec)	Pulshalbwerts- breite (μ sec)	Scheitel- strom (kA)	Lampenwider- stand beim Scheitel- strom (Mittelwerte) (Ω)
20	2,65	0,66	12,0	5,0 ... 5,8	12	840
30	5,96	1,49	9,5	4,6 ... 4,8	22	770
40	10,60	2,65	8,5	4,8 ... 5,0	30	700
45	13,41	3,35	8,0	4,8	40	620

Bei einer Energie von 2,6 kJ/Lampe lag die mittlere Lebensdauer der Lampen bei 100 Entladungen. Mit 48 kV Ladespannung bzw. 3,5 kJ/Lampe waren von 4 Lampen 2 bereits nach einer Entladung zerstört. Alle anderen Komponenten für die im Aufbau befindliche große Laser-Batterie arbeiten einwandfrei.

2.2.3 Energieaufnahme eines HF-Lasers ¹⁾

(G. Klement, K.L. Kompa/E4, H. Pummer/E4, H. Wedler)

In Zusammenarbeit mit der Abteilung E4 wurde an einem HF-Lasersystem die Leistungsaufnahme in Abhängigkeit vom Druck untersucht. Bei einem Druck 144 Torr SF_6 und 6 Torr H_2 ist die Leistungsaufnahme am größten, d.h. nahezu die gesamte gespeicherte Energie (240 J) wird in der ersten Halbwelle (500 nsec) an das Lasermedium abgegeben. Etwa 200 nsec lang steht an der Laser-Kammer eine Spannung von 64 kV an, dann bricht sie infolge Überganges der Glimmentladung in eine Bogenentladung zusammen. Bei diesem Übergang erlischt der Laser. Bei höheren und geringeren Drucken (gemessen wurden zwischen 250 und 1 Torr) wird die Spannung an der Kammer kleiner, und die Entladung geht in eine periodische, gedämpfte Entladung über, d.h. der Widerstand der Entladung und die Leistungsaufnahme sinken. Weitere Messungen mit einem 5-stufigen Generator sind in Vorbereitung.

2.2.4 CO_2 -Laser

(H. Baumhacker, H. Brinkschulte, E. Fill, C. Grigoriu ²⁾, W. Schmid, A. Wasner, F. Zitzmann)

Im Berichtsjahr hat sich der Schwerpunkt der Laserentwicklung auf den Bau eines Höchstleistungs- CO_2 -Lasers verschoben, der bei den Experimenten zur Plasmaerzeugung durch Laser eingesetzt werden soll. Es wurde ein Proposal für einen 100 J/1 ns- CO_2 -Laser ausgearbeitet und nach Diskussion mit den an diesem Laser interessierten Anwendern mit den Arbeiten zu dessen Realisierung begonnen. Das System wird aus einem Oszillator bestehen, der einen Puls von etwa 1 ns Länge und geringer Energie liefert; diese Energie wird in 3 folgenden Verstärkerstufen, bei denen unterschiedliche Entladungsprinzipien angewendet werden, auf den Endwert von 100 J verstärkt.

¹⁾ H. Pummer, W. Breitfeld, G. Klement, H. Wedler, K.L. Kompa: Appl. Phys. Lett., erscheint im April 1973.

²⁾ Gast vom Institut für Atomphysik, Bukarest, Rumänien.

- 1) Oszillator: Die Entladung des Oszillators arbeitet nach dem ursprünglichen TEA-Prinzip mit vielen widerstandsentkoppelten Entladungen: In ein 220 cm langes Entladungsrohr sind etwa 300 helisch angeordnete Nadelelektroden eingeklebt, über die ein auf 30 kV geladener Kondensator von einigen nF entladen wird. Diese Art Entladung liefert einen Laserstrahl von 6 mm Durchmesser, dessen Divergenz von 2 mrad praktisch beugungsbegrenzt ist. Der Laser schwingt auf der P(20)-Linie und liefert im freischwingenden Betrieb eine Energie von 350 mJ. Es ist nicht ratsam, die Energie zu erhöhen, da dies schnell zur Beschädigung der optischen Komponenten führt. Durch akustooptische Modulation der Resonatorgüte mit einem Germanium-Einkristall wird die Emission 100 %ig moduliert und erscheint als Zug äquidistanter Pulse von etwa 1 ns Dauer (aktives Modenkoppeln).¹ Mit einem Pulsschneidesystem, das aus einem GaAs-Einkristall, einem Germaniumplattenpolarisator und einer lasergetriggerten Funkenstrecke besteht, wird ein einzelner Puls separiert. Die Energie des weiter zu verstärkenden Einzelpulses beträgt 5 mJ bei einem Unterdrückungsverhältnis (Energie des selektierten Pulses : Energie eines Vorpulses) von 360 : 1. Das System Oszillator - aktive Modenkoppler - Pulsselektierer arbeitet sehr reproduzierbar, insbesondere im Hinblick auf Pulsenergie und Strahlrichtung.
- 2) Verstärker I: Der erste Verstärker benutzt zur Anregung eine Doppelentladung: Hauptentladung zwischen zwei Elektroden, die ungefähr ein Rogowskiprofil haben, und Vorionisierung über 2 dünne Drähte in der Mittelebene zwischen beiden Elektroden. Der Querschnitt der Entladung ist $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$. Es wurde ein Prototyp mit 60 cm Elektrodenlänge gebaut und die Entladungsparameter für zuverlässigen und optimalen Laserbetrieb bestimmt. Der Oszillatorpuls wird nach Durchlaufen von 3 solchen Sektionen auf etwa 17 verstärkt werden.
- 3) Verstärker II: Dieser Verstärker hat einen Querschnitt von $5 \times 5 \text{ cm}^2$ und verwendet ebenfalls eine Doppelentladung, wobei die Vorionisierung über eine Vielzahl kleiner Bögen zwischen einer Stiftmatrix und einer Netzelektrode erfolgt. Der mechanische Aufbau für den Prototyp einer solchen Entladung wurde fertiggestellt. Die Laserenergie wird am Ausgang dieses 2 m langen Verstärkers etwa 10 J betragen.
- 4) Verstärker III: Im letzten Verstärker wird die Laserenergie auf 100 J gebracht. Da die Flächenbelastung der optischen Komponenten für sicheren Betrieb 1 J/cm^2 nicht überschreiten sollte, muß der Querschnitt des Laserstrahls mindestens 100 cm^2 sein. Es ist also eine homogene Volumenentladung über eine Strecke von etwa 10 cm erforderlich. Wir haben uns für eine durch einen großflächigen Elektronenstrahl kontrollierte Entladung entschieden. Die dazu notwendige Elektronenkanone wurde bei der Firma ESI in Boston/U.S.A. bestellt. Der voraussichtliche Liefertermin ist April/Mai 1973. Der Elektronenstrahl von $10 \times 100 \text{ cm}^2$ hat eine Energie von 200 kV bei Stromdichten von 50 mA/cm^2 während eines $10 \text{ } \mu\text{s}$ langen Pulses.

Da das Prinzip elektronenstrahlkontrollierter Entladungen sehr erfolgversprechend ist, um große Volumina homogen anzuregen, und dieses Verfahren auch für andere Lasertypen anwendbar ist, wurde die Eigenentwicklung einer Elektronenkanone in Angriff genommen. Unsere Maschine zielt, bei etwa gleicher Elektronenenergie, Pulsdauer und Strahlquerschnitt, auf wesentlich höhere Stromdichten als bei der kommerziellen Elektronenquelle (für Entladungen bei Drücken über 1 atm). Die schwierigsten technologischen Probleme sind gelöst worden: Es stehen mehrere geeignete Kathoden zur Verfügung (direkt geheizte aus LaB_6 bzw. thoriertem Wolfram und indirekt geheizte Nickel-Schwamm- bzw. Wolframvorrats-Kathoden). Kathoden samt Halterung und Heizung wurden unter Betriebsbedingungen getestet und maximale Emissionsstromdichten von 15 A/cm^2 gemessen. Elektronenoptische Untersuchungen führten zu den günstigsten Kathodenformen (Pierce-Optik). Als Lenardfenster wurden Alu-, Titan- und Zirkonfolien auf ihre mechanische Festigkeit bei den geforderten Querschnitten und Druckdifferenzen getestet sowie eine geeignete Konstruktion für die Vakuumdichtung gefunden. Optimal ist eine $25 \text{ } \mu\text{m}$ starke

¹E. Fill, H. Baumhacker, F. Hofmeister, : IPP 4/106

Titanfolie. Für die Energieversorgung wurde ein 200-kV-Pulsgenerator berechnet und gebaut. Er besteht aus einem Blumleinsystem mit konzentrierten Bauelementen und einer lasergetriggerten 150-kV-Funkenstrecke. Der gemessene Spannungspuls an einem simulierten Verbraucher entspricht exakt dem berechneten (Abb. 21); es wurde eine maximale Spannung von 240 kV erreicht. Das Problem der Hochspannungsdurchführung vom Generator ins Vakuumsystem machte einige Schwierigkeiten und wurde mit Hilfe einer kommerziellen Durchführung der Firma Vacuum Generators gelöst. Die Konstruktion arbeitet bis zu Spannungen über 150 kV zufriedenstellend.

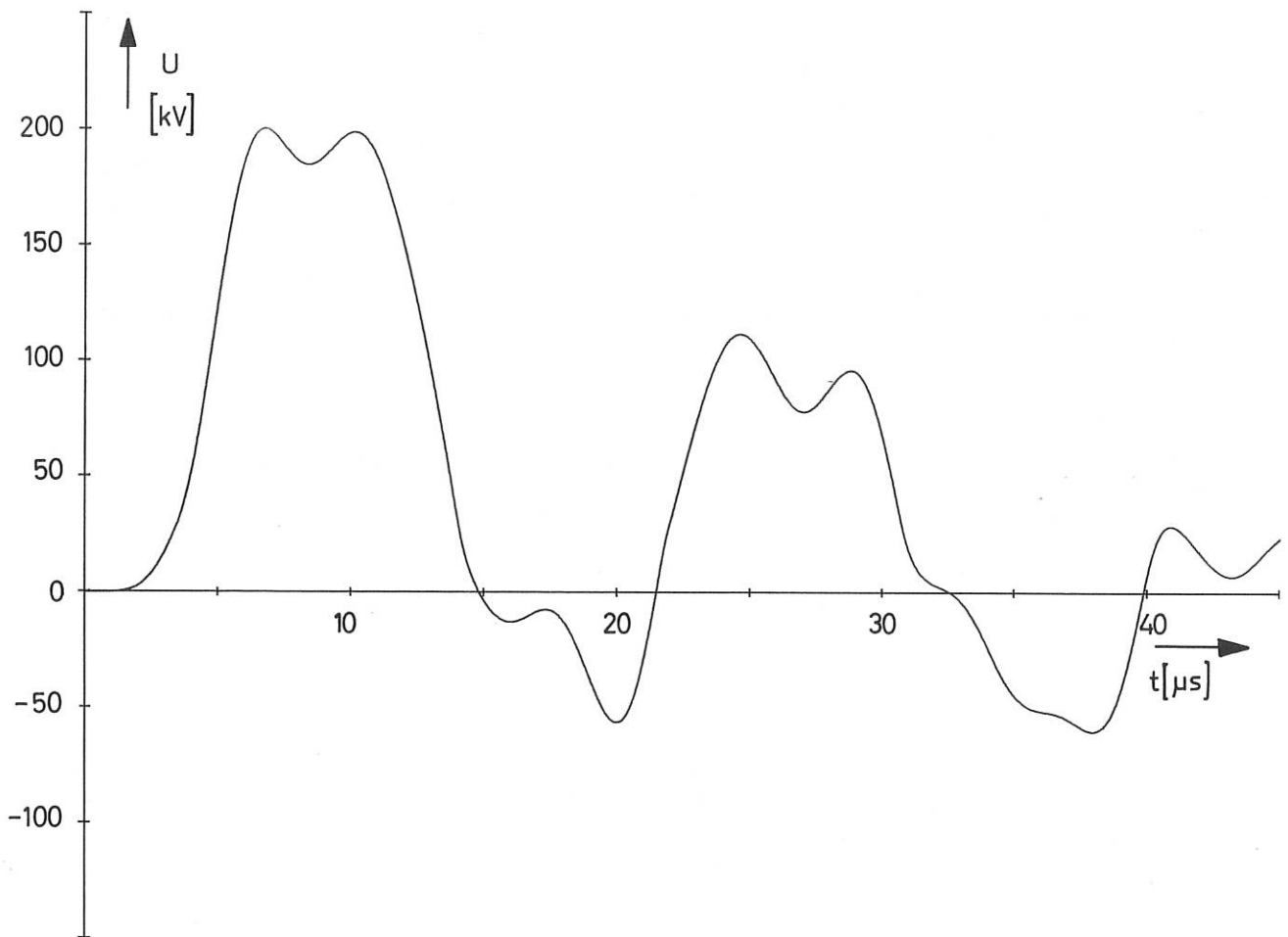


Abb. 21 Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung des Pulsgenerators

Theoretische Untersuchungen: Das Problem der zeitlichen Pulsverformung in einem Laserverstärker wurde theoretisch untersucht. Ausgehend von den semiklassischen Gleichungen für die Pulsfortpflanzung in einem Zweiniveauperfahren wurde die Verformung eines Gauß'schen Eingangspulses beim Durchgang durch einen CO_2 -Laserverstärker numerisch bestimmt. Es zeigt sich, daß die Anstiegszeit eines Nanosekundenpulses nach Durchgang durch einen Verstärker der geplanten Länge um fast eine Größenordnung verkürzt wird. Die experimentelle Überprüfung dieses interessanten Befundes wurde vorbereitet (Abb. 22).

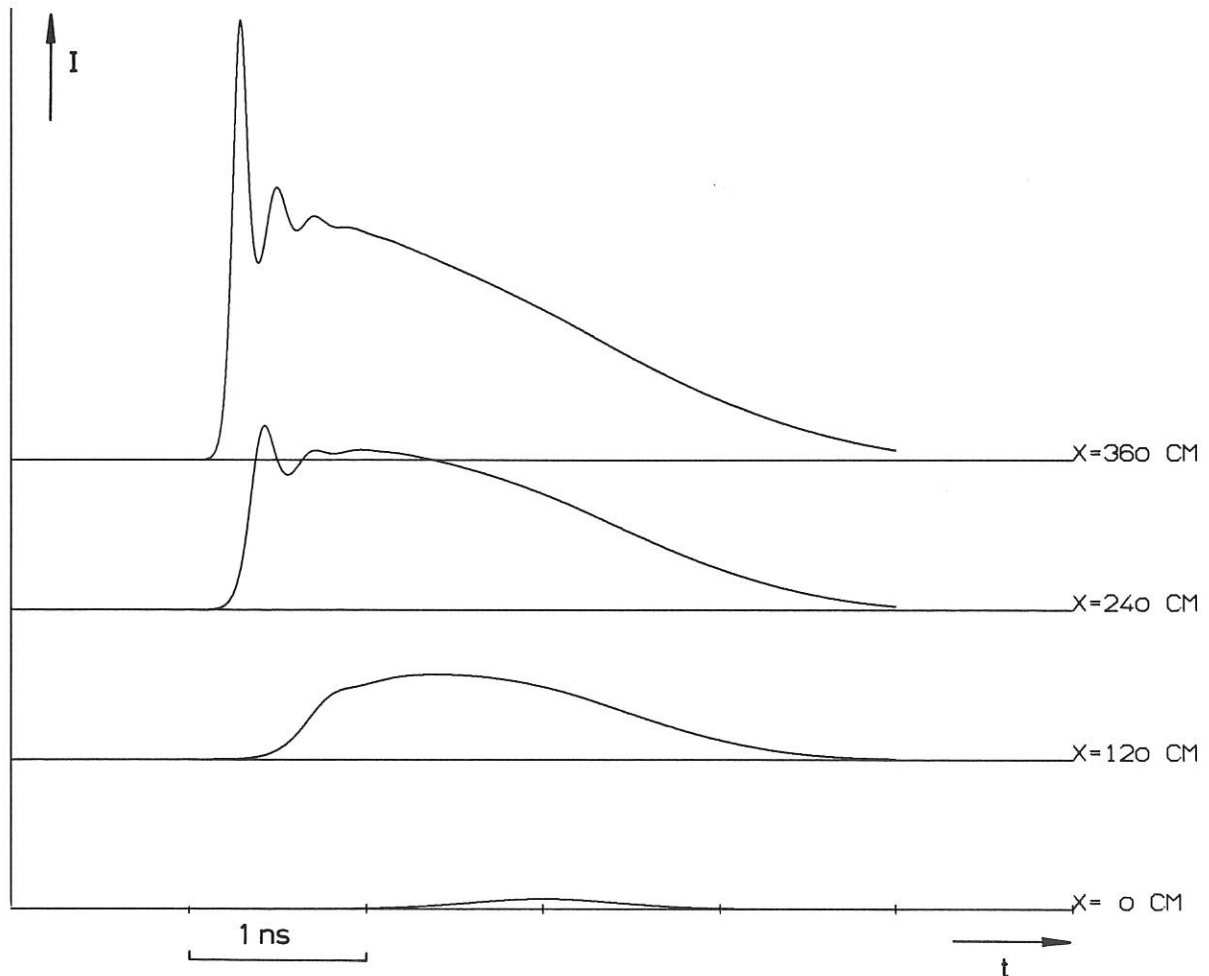


Abb.22 Verformung eines Gauß'schen Eingangspulses nach Durchgang durch einen 120, 240 und 360 cm langen Verstärker.

Intensität des Eingangspulses	$I_0 = 20 \text{ MW/cm}^2$
Maximale Intensität des Ausgangspulses	$I_{\text{out}} = 850 \text{ MW/cm}^2$
Inversionsdichte im Verstärker	$4 \times 10^{17} / \text{cm}^3$

2.2.5 Stickstofflaser (E. Fill, W. Schmid)

Für Experimente zur Erzeugung von Plasma durch fokussiertes Laserlicht ist ein Laser, dessen Wellenlänge kürzer ist als die des heute zumeist verwendeten Neodym-Glaslasers, wahrscheinlich geeigneter. Die cut-off-Elektronendichte nimmt nämlich umgekehrt proportional zum Quadrat der Wellenlänge zu, wodurch eine höhere Absorption, d.h. effektivere Heizung des Plasmas, zu erwarten ist. Der Stickstofflaser im zweiten positiven System mit dem Übergang $C^3\pi_u \longrightarrow B^3\pi_g$ scheint wegen seiner Wellenlänge von 3371 \AA sehr interessant. Es wurden theoretische Studien durchgeführt (die für den Laserbetrieb relevanten Reaktionen sowie deren Querschnitte sind weitgehend bekannt), um die Abhängigkeit der Laserenergie von wichtigen Parametern - wie Druck des Lasergases und Aufbau des Entladungskreises - zu bestimmen. Da die Lebensdauer des

oberen Laserniveaus nur etwa 40 nsec ist, muß das Medium sehr schnell gepumpt werden. Am geeignetsten ist wohl ein Blumleinsystem, dessen Impedanz möglichst klein sein sollte. Es zeigte sich, daß die Laserenergie proportional zum Druck des Lasergases und umgekehrt proportional zur Impedanz der Pumpquelle steigt. Der maximal zu erwartende Wirkungsgrad liegt bei etwa 1%. Der Bau energiereicher Stickstofflaser führt über die Entwicklung schneller Energiespeicher sowie über die Beherrschung homogener Volumenentladungen bei höheren Drücken.

2.2.6 Anorganische Flüssigkeitslaser ^{1,2,3,4}

(H. Brinkschulte, R. Lang, J. Perchermeier, F. Zitzmann)

Die Arbeiten am anorganischen Flüssigkeitslaser wurden mit einer genauen Untersuchung der stimulierten Streuprozesse in der Laserflüssigkeit zu Ende geführt. Außerdem wurde ein zuverlässig arbeitender Flüssigkeitslaser mit einer Pulsfolge bis zu 10 Hz fertiggestellt.

Stimulierte Streuprozesse

In einem Neodymflüssigkeitslaser $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ treten im gütegeschalteten Betrieb mit wachsender Leistungsdichte zunächst stimulierte Brillouin-Streuung (SBS) und, bei noch höheren Intensitäten, stimulierte Raman-Streuung (SRS) auf. Das Einsetzen dieser stimulierten Streuprozesse wurde in Abhängigkeit von der Emissionslinienbreite und der Auskoppelverluste des Resonators bestimmt.

Die SBS ist nicht so ohne weiters nachzuweisen, da sie nur um etwa $1/10 \text{ \AA}$ von der normalerweise einige Å breiten Laserlinie verschoben ist. Deshalb wurde die Emissionslinienbreite auf $2/100 \text{ \AA}$ gebracht (durch Einkopplung von Fremdlicht dieser Linienbreite in den Resonator). Schon bei geringen Leistungsdichten tritt SBS auf. Dies konnte aus der mit Hilfe eines Fabry-Pérot Interferometers gemessenen Linienverschiebung um $0.1 \pm 0.01 \text{ \AA}$ eindeutig geschlossen werden.

Es zeigte sich, daß die bei höheren Intensitäten einsetzende SRS für den Oszillator einen nichtlinearen Verlustmechanismus bedeutet, der letztlich die Ausgangsleistung des Lasers begrenzt.

10-Hz-Laser

Beim Bau des 10 Hz-Lasers traten noch unerwartete technologische Schwierigkeiten auf, da die ursprünglich vorgesehenen Bauteile aus vernickeltem Metall über längere Zeiträume nicht resistent sind gegen die aggressive Laserflüssigkeit. Die neue Umlaufapparatur besteht nun nur aus Glas- und Teflonteilen. Der Laser liefert bei 10 Hz nach einer Anheizzeit von ca. 3 min reproduzierbare 50-MW-Pulse.

2.2.7 Mehrstufiger Neodymglaslaser

(H. Baumhacker, Zusammenarbeit mit der Lasergruppe in Abt.E4)

Bei dem mehrstufigen Neodymglaslaser wurde das Verhalten des Oszillatorpulses bei axialer Modenselektion, das Zusammenwirken der bei uns entwickelten Anlage mit einer Verstärkerstufe der Fa. CILAS und die Stabilität des gesamten Systems hinsichtlich Energie und Richtung des Laserstrahles untersucht. Es konnte eine maximale Laserenergie von 70 J in einem 5 ns breiten Puls erreicht werden. Um Zerstörungen im Neodymglas der letzten Verstärkerstufe auszuschalten, empfiehlt sich jedoch, die Anlage nur bis 50 J zu betreiben. Die Strahldivergenz (halber Winkel) beträgt bei halber Maximalenergie $0,5 \text{ mrad}$.

¹Brinkschulte, H., Fill, E., Lang, R.: J. Appl. Phys. 43 (1972) S. 1807-1811.

²Fill, E., K. Graf v. Finckenstein.: IEEE J. of Quantum Electronics QE-8,24-26, 1972.

³Fill, E.: Z. für angewandte Physik, 32, 356-358 (1972).

⁴Lang, R.: Frühjahrstagung der DPG, Kiel, März, 1972.

2.2.8 Erprobung eines Lasersystems und eines Lichtleiters für die Zündung
von Funkenstrecken^{1,2,3}

(M. Pillsticker)

Die im Vorjahr begonnenen Arbeiten an der Entwicklung eines kompakten, für die Zündung von Funkenstrecken leicht justierbaren Lasersystems wurden fortgesetzt. Das fahrbare, beim Betrieb aber feststellbare Gestell nimmt alle Energieversorgungs- und Steuereinschübe für den Laser und die zur Überwachung des Lasers notwendige Meßvorrichtung auf (Abb. 23). Der installierte YAG-Laser liefert im Q-switch-Betrieb bei der größten erlaubten Pulsfolge von 1 Hz maximale Pulsleistungen von 19 MW bei 9,5 ns Pulshalbwertzeit. Um ein langfristig einsatzbereites Gerät für Dauerbetrieb zu erhalten, waren technische Probleme zu lösen:

Der optische Schalter (Pockelszelle) wurde im Aufbau geändert. Gewählt wurde ein zylinderförmiger Kristall, der zur optischen Anpassung in Silikonöl eingebettet wurde. Es wurden nach hochspannungstechnischen Gesichtspunkten geformte Elektroden benutzt, um hohe elektrische Feldstärken zu vermeiden. Daher traten örtliche Vorentladungen in der Pockelszelle und dadurch eingeleitete Verschmutzung mit nachfolgender Elektrolyse nicht auf. Für Silikonöl kann auch Silikon gummi als lichtdurchlässiges Einbettungsmittel benutzt werden. Da der Kristall mit den Elektroden eingegossen wird, ist dies eine sehr dauerhafte, aber in der Herstellung komplizierte Lösung. Um der schnellen Verschmutzung der Blitzlampen durch Kühlwasser vorzubeugen, wurde ein indirektes Kühlsystem gewählt. Gleichzeitig wurde auf eine Ignitronschaltung verzichtet. Die direkte Zündung der Blitzlampen erfolgt sicher und mit hinreichender Genauigkeit. Der Laser wurde einem Pulsdauertest und die Pockelszelle einem zusätzlichen Zeit-Dauer-Test unterzogen.

Untersuchungen mit einem Selffoc-Lichtleiter sind noch nicht abgeschlossen. Eine technisch verwendbare Lösung zeichnet sich bisher noch nicht ab.

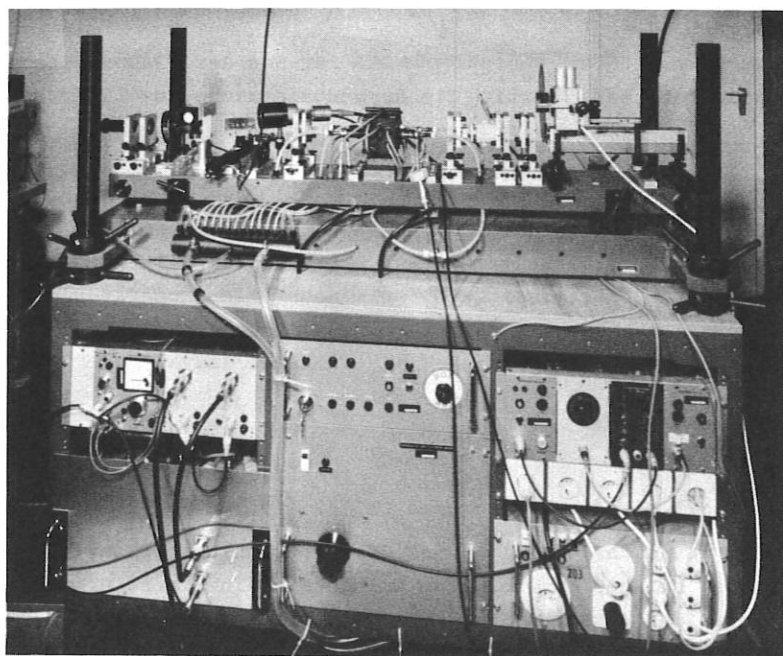


Abb. 23
Lasersystem zur
Zündung von Funkenstrecken

¹Pillsticker, M.: Konf.-Veröffentl. Int. Symp. Hochspannungstechnik München, März 1972

²Pillsticker, M.: Conf. Publ., 2nd International Conference on Gas Discharges, London, Sept. 1972.

³Pillsticker, M.: IPP 4/102

2.2.9 Kristallzucht

(C.P. Ernst)

Die in unseren Verneuil-Anlagen gezogenen Rubinrohlinge wurden bei der Firma Effgen & Söhne getempert, rundiert und geschliffen. Es ergaben sich 7 für Laserzwecke brauchbare Kristalle, die im spikenden, aktiv- und passiv-gütegeschalteten Laserbetrieb getestet wurden. Die dabei gemessenen maximalen Laserenergien von 28 J; 3,5 J bzw. 2,3 J entsprechen den Werten kommerzieller Rubinstäbe gleicher Dimensionen. Daneben wurden die optische und kristallographische Homogenität der Kristalle untersucht. Die gefundenen Versetzungen und Schlieren entstehen während des Ziehens infolge des großen radialen und axialen Temperaturgradienten im Rohling und sind typisch für Verneuil-Kristalle. Nach Einbau eines als Nachheizzone in der Ziehanlage dienenden Rohrofens sollten die Kristalle homogen sein und die Wahrscheinlichkeit für deren - hin und wieder immer noch vorkommendes - Zerspringen bei Beendigung des Ziehversuches weiter verringert werden.

Ein weiteres Versuchsprogramm galt der Bestimmung der Schmelzfilmdicke, für die in der Literatur Werte zwischen einigen μm und 2 mm angegeben werden. Dazu wurden während des Ziehens kleine Kügelchen aus Stahl, Wolfram oder Zirkonoxyd auf die Schmelzkappen gebracht. Die Fremdkörper reagierten mit dem Aluminiumoxyd und sinterten ein. Nach dem Abkühlen zeigten die so behandelten Kristalle eine dünne "Haut", aus deren Stärke von etwa 1 mm auf die Schmelzfilmhöhe geschlossen werden konnte.

An der Czochralski-Zieheinrichtung wurden mehrere Ziehversuche durchgeführt. Es zeigte sich, daß das kommerziell erhältliche Kristallpulver nicht genügend rein ist und zuvor aufbereitet werden müßte, um brauchbare Kristalle herstellen zu können. Da außerdem technische Schwierigkeiten während des Ziehens auftraten (Steuerung der Heizung, Verunreinigung durch verdampfendes Spindelmaterial, Ribbildung im Quarzglaszylinder aufgrund ungenügender thermischer Isolation, Vibration der Anlage), deren Beseitigung einen erheblichen Aufwand erfordert hätten, wurden die Arbeiten an der Czochralski-Anlage eingestellt.

3 Fusionsreaktortechnologie¹

3.1 Systemstudien

(W. Dänner, A. Knobloch, K.H. Schmitter)

Am Beispiel der Tokamak-Konfiguration wurden technische und ökonomische Skalierungs- und Optimierungsbedingungen aufgestellt. Zwei Arbeiten in diesem Zusammenhang über stationäre und quasi-stationäre toroidale Fusionsreaktoren wurden auf der Sommer-Schule in Erice im September vorgetragen.^{2,3} Als Hilfsmittel für weitere Systemstudien, vorwiegend der Tokamak- und Stellarator-Konfigurationen, wurde das Rechenprogramm THESYS erarbeitet, mit dem die wichtigsten Plasma- und technischen Parameter toroidaler Systeme bestimmt werden können

3.2 Planung der Fusionsreaktortechnologie

3.2.1 EURATOM-Aktivitäten

(F. Karger/E3, A. Knobloch, W. Köppendörfer/E 1, G. Nützel, B. Scherzer/Abt. 9, H. Vernickel/Abt. 9)

Im Hinblick auf die wachsende Größe fusionsorientierter Experimente und die vorhersehbaren beträchtlichen Aufwendungen für Zwischenstudien zum Fusionsreaktor hat schon jetzt ein reger internationaler Austausch über Konzepte und Programme begonnen. Im EURATOM-Bereich geschieht dies zur Zeit in der Advisory Group on Fusion Reactor Technology sowie der Joint European Tokamak (JET) Working Group.

¹K.H. Schmitter: Deutsche Reaktortagung 1972 Hamburg, Atomwirtschaft 1972.

²A. Knobloch, Proc. Int. School on Fusion Reactor Technologie, Erice 1972.

³K.H. Schmitter: Proc. Int. School on Fusion Reactor Technologie, Erice 1972.

Die JET-Gruppe hat 1972 die Grundlagen für einen ersten Bericht erarbeitet, in dem der Parameterbereich für ein großes toroidales Experiment, das vielleicht Reaktorzündbedingungen erreichen kann, eingegrenzt wird. Es wird weiterer, intensiver Planungsarbeit bedürfen, um dieses internationale Experiment bis etwa 1976 zu definieren.

Die Fusionsreakorttechnologie-Gruppe gab aufgrund ihres ersten Berichts (siehe Jahresbericht 1971) die dann akzeptierte Empfehlung, in den assoziierten Laboratorien Systemstudiengruppen einzurichten. Sie bereitete sich ferner durch Diskussion von Wertungskriterien auf die Aufgabe vor, Programmvorschläge aus den einzelnen Laboratorien zur Fusionsreakorttechnologie im Hinblick auf ihre tatsächliche Relevanz zu beurteilen.

3.2.2 Deutsches Fusionsreaktormemorandum

(H. Brinkschulte, W. Dänner, G. Grieger/E2, H. Herold/E 1, A. Knobloch, F. Rau/E 2, K.H. Schmitter, H. Weichselgartner, H. Wobig/E 2, D. Zimmermann)

Im Berichtsjahr wurden die einzelnen Beiträge (siehe Jahresbericht 1971) fertiggestellt.

3.3 Blanket-Technologie

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Blanket-Technologie konzentrierten sich auf 3 Schwerpunkte:

3.3.1 Kühlungsprobleme^{1,2}

(W. Dänner)

Die bereits 1971 im Rahmen des Fusionsreaktor-Memorandums begonnenen Studien über das Kühlpotential von Lithium und Flibe wurden fortgeführt. Das vorläufige Endergebnis dieser Arbeiten schlug sich in der Aufstellung und Auswertung einiger Auslegungskriterien für die beiden Kühlungsarten nieder.

3.3.2 Neutronenfluß-Asymmetrie³

(W. Dänner)

Als Beitrag zur Diskussion über die "maximal zulässige Wandbelastung" wurde die Neutronenfluß-Asymmetrie in toroidalen Geometrien rechnerisch untersucht. Unter den Voraussetzungen des Plasmas als isotrop strahlender Volumenquelle und der ersten Wand als idealem Neutronen-Absorber wurde die Winkelverteilung der Fusions-Neutronen beim Eintritt in die erste Wand ermittelt. Eine zweimalige numerische Integration der Winkelverteilung führte zum Gesamtneutronenfluß in Abhängigkeit von den geometrischen Größen einer toroidalen Anordnung. Das Verfahren wurde auf Stellarator- und Tokamak-Geometrien angewandt. Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß der untersuchte Effekt von untergeordneter Bedeutung für die Auslegung eines Fusionsreaktors ist.

3.3.3 Tritiuminventar eines Fusionsreaktors

(W. Dänner, J. Perchermeier, H. Weichselgartner)

Die Höhe des notwendigen Tritiuminventars stellt ein Schlüsselproblem bei der Entwicklung eines Fusionsreaktors dar, da sie eine wesentliche Grundlage für die Beurteilung von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit liefert. Es wurden zunächst die Grundlagen zur Bearbeitung dieses Problems zusammengetragen. Detaillierte Untersuchungen unter Einbeziehung verschiedener Kühlkonzepte, Wärmekraftprozesse und Strukturmaterialien wurden begonnen. Als Verfahren zur effektiven Abtrennung des Tritiums aus dem Moderator wird dabei das Diffusions-Wirbelschichtverfahren (siehe Abschnitt 2.3.4) vorausgesetzt.

¹W. Dänner: Detusche Reaktortagung 1972, Hamburg; IPP 4/97.

²W. Dänner: Proc. 7th Symp. on Fusion Reactor Technology, Grenoble, October 1972.

³W. Dänner: Proc. 7th Symp. on Fusion Reactor Technology, Grenoble, October, 1972.

3.3.4 Tritium-Rückgewinnung¹⁾

(J. Perchermeier, H. Weichselgartner)

Das bereits im Vorjahr vorgeschlagene und beschriebene Diffusions-Wirbelschicht-Verfahren wurde überarbeitet und nun für ein System von Niob-Röhren ausgelegt, da eine konzentrische Anordnung der Wirbelschicht um das Blanket fertigungstechnisch und wirtschaftlich wohl zu aufwendig sein wird. Die Niob-Röhren hingegen durchziehen das Blanket direkt.

Daten einer aus Niob-Röhren aufgebauten Wirbelschicht-Anordnung: ²⁾

T-Brutmenge	43,2 ml/sec	Länge	40 m
T-Inventory	8 kg (160 ppm)	Zr-Kapazität	10 kg
Druck im Blanket	0,014 mm Hg	Zr-Flußrate	100 g/sec
Druck in den Niob-Röhren	0,002 mm Hg	Zr-Konzentration	1 g/l
Permeationsfläche	1700 m ²	Temperatur	800° C
Wandmaterial	1 mm Nb	Teilchengeschwindigkeit	1 m/sec
Röhrendurchmesser	25 mm	Ausbeute (Zr-H ₂)	66 %
Anzahl	500		

Die Daten für die Diffusion von Tritium durch Niob wurden analog den Berechnungen von Fraas ³⁾ erhalten. Für die Reaktion zwischen dem durch die Nb-Röhren diffundierten Tritium und dem als feste Phase der Wirbelschicht fungierenden Zr-Pulver wurde eine Ausbeute von lediglich 66 % angenommen. In Abb. 24 sind die Zusammenhänge zwischen Röhrenlänge, Geschwindigkeit der Wirbelschicht und Anzahl der Röhren dargestellt.

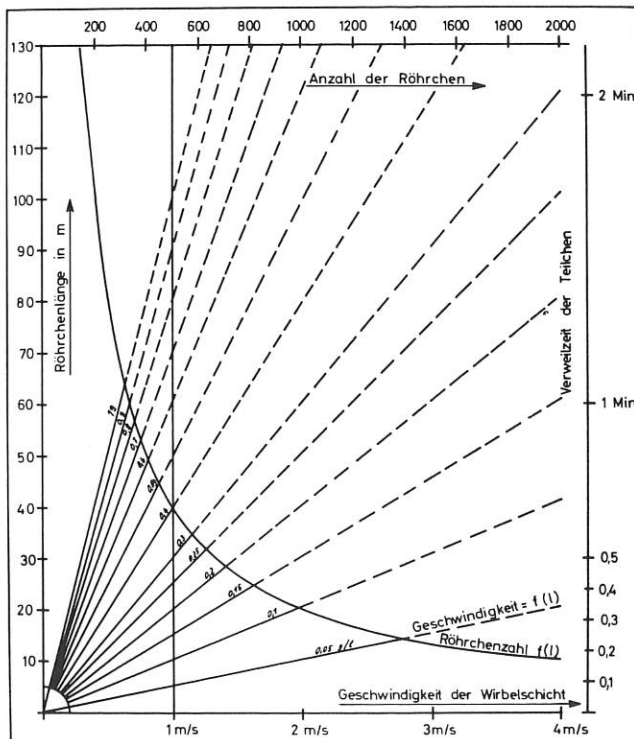


Abb. 24
Zusammenhang zwischen Röhrenlänge,
Geschwindigkeit der Wirbelschicht
und Anzahl der Röhren

1) H. Weichselgartner: Detusche Reaktortagung 1972, Hamburg

2) H. Weichselgartner: Proc. 7th Symp. on Fusion Technology, Grenoble, October 1972.

3) A.P. Fraas: USAEG Rep. ORNL-TM-2358, Dezember 1968

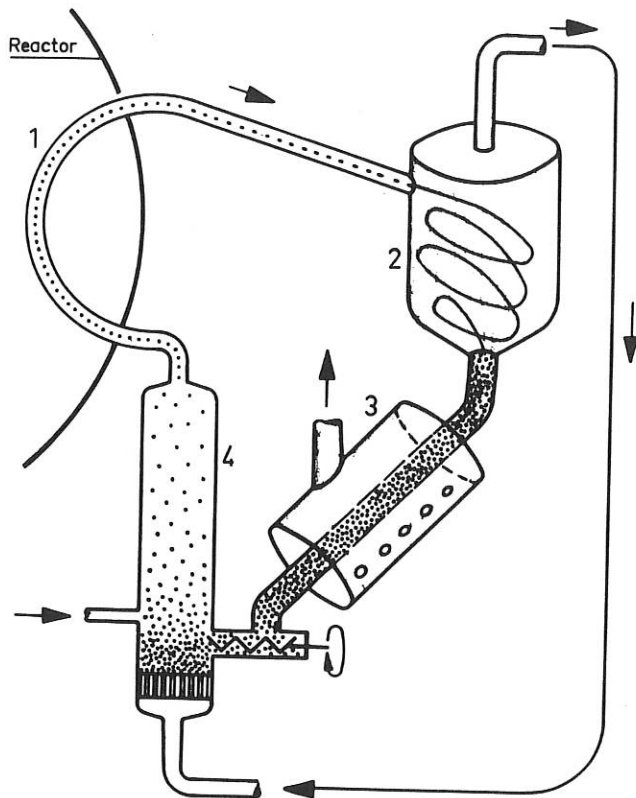
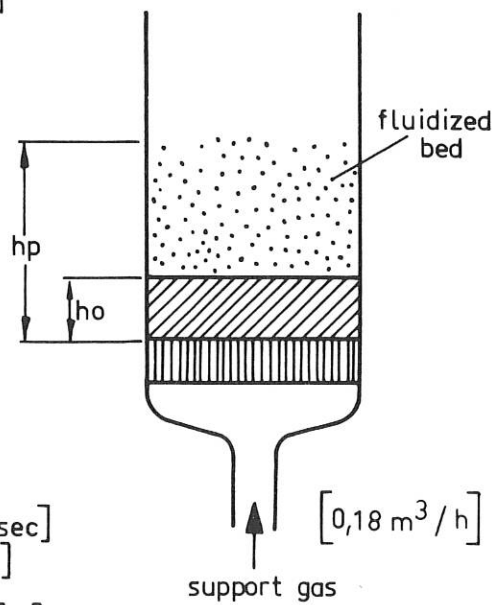


Abb. 25

Schema der Tritiumrückgewinnung

- 1 Niob-Röhrchen
- 2 Zyklon
- 3 Erhitzungszone
- 4 Wirbelschichtaufbereiter

30g Ti powder
ca. 75 μ



$$v = 1 \text{ m/sec}$$

$$\xi_p = 0,5$$

$$h_p = 15 \text{ [mm]}$$

$$v_p = 0,036 \text{ [m/sec]}$$

$$d = 1 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$l_{\text{max}} = 200 \text{ [m]}$$

Abb. 26

Experimenteller Aufbau zur
Bestimmung der Maximallänge für
den Wirbelschichttransport

Es ergibt sich, daß bereits 10 kg Zr-Metall ausreichen, das ganze Tritium chemisch zu binden und durch das Wirbelschichtsystem aus dem Reaktor in das Tritium-Rückgewinnungssystem zu transportieren. Ein Schema dieser Anlage ist in Abb. 25 dargestellt. Ein wichtiges Kriterium eines Wirbelbettes ist die max. Länge, über die eine Wirbelschicht aufrecht erhalten werden kann. Wir haben dazu ein Modell aufgebaut, um die zur Berechnung notwendigen Parameter experimentell zu erhalten (Abb. 26). Die maximale Länge errechnet sich aus

$$l_{\max} = \frac{v \cdot d_s (1 - \xi_p) h_p}{v_p \cdot d}$$

Dabei ist

v = Geschwindigkeit der Wirbelschicht	h_p = Höhe der Wirbelschicht am Wirbelpunkt
d_s = scheinbare Dichte	v_p = Geschwindigkeit am Wirbelpunkt
ξ_p = Kornzwischenraum am Wirbelpunkt	d = vom Medium transportierte Teilchenmenge

3.3.5. Tritium-Diffusion

(H. Häglsperger, J. Perchermeier, A. Stimmelmayer, H. Weichselgartner)

Um die Möglichkeit der Rückgewinnung von Tritium auf dem Weg der Permeation durch Niob zu untersuchen, soll die Diffusionsrate von H_2 (bzw. T_2) aus flüssigem Helium durch Niob in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt werden. Dazu wird flüssiges, mit H_2 dotiertes Lithium in einem zentrisch in einem Heizzyylinder angeordneten Behälter, der von außen beschickt werden kann, auf max. $800^\circ C$ erwärmt. In das Lithiumbad taucht ein U-förmiges Niob-Rohr, das als Diffusionsstrecke dient. Die Tauchtiefe kann mit Hilfe zweier Metallbälge bis 100 mm variiert werden. Der Heizzyylinder ist ein isothermer Ofen, der mit flüssigem Natrium betrieben wird und in einem Vakuumgefäß sitzt. Um zu verhindern, daß sich festes Lithium an kalten Teilen niederschlägt, wird das ganze System auf einer Temperatur von $200^\circ C$ gehalten.

3.4 Elektrotechnische Probleme des Fusionsreaktors

3.4.1 Berechnungen des transienten Verhaltens toroidaler Spulensysteme

(Numerisches Beispiel: W VII) (H. Preis)

Die Energieversorgung der Hauptfeldspulensysteme von Stellaratoren und Tokamaks erfolgt in der Regel durch Synchron-Stoßleistungsgeneratoren. Der auf die im wesentlichen induktive Last abgegebene Stromimpuls kann in drei Phasen, die Auferregungs-, die Flat-Top und die Entregungsphase aufgeteilt werden. Neben der analytischen Beschreibung dieses Impulszyklus wurden die Auswirkungen eines Kurzschlusses an einer sowie an mehreren Spulen untersucht. Durch die dann gestörte Magnetfeldsymmetrie des toroidalen Feldes wirken auf die Spulen bei den hohen Feldstärken erhebliche Kräfte, für deren Berechnung die Spulenströme maßgebend sind. Mit der FORTRAN-Routine NETZWERKE 1 wurden die nach Eintritt eines Kurzschlusses einsetzenden transienten Vorgänge unter Berücksichtigung aller induktiven Kopplungen analysiert. Diese Berechnungen sind für alle drei Impulsphasen durchgeführt worden. Die Übergangsströme, die sich während der Auferregung nach einem Kurzschluss einstellen, sind aus Abb. 27 zu entnehmen.

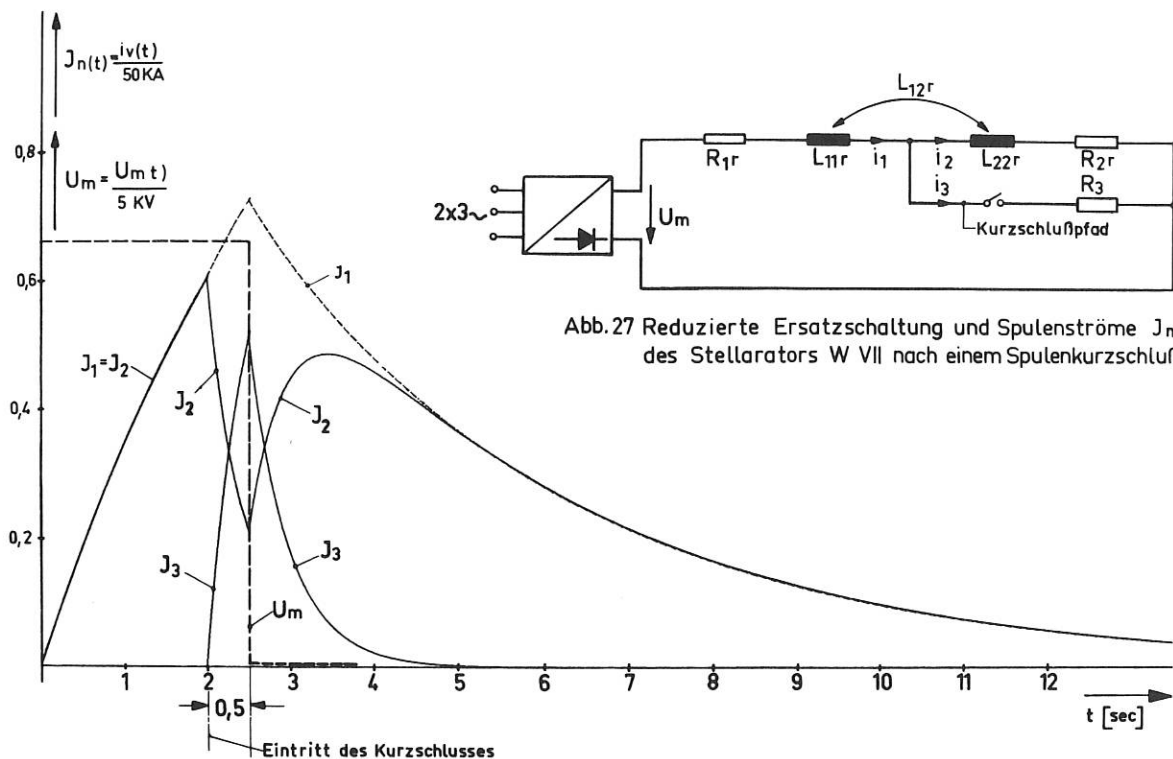


Abb. 27 Reduzierte Ersatzschaltung und Spulenströme $J_n(t)$ des Stellarators W VII nach einem Spulenkurzschluß

3.4.2 Berechnung der mechanischen Spannungen in den Wicklungen der Hauptmagnetfeld-Spulen totoidaler Fusionsmaschinen¹

(R. Pöhlchen, Ch. Ludescher)

Zur Illustration des Problems sei hier die von File, Mills, and Sheffield in einer Fusions-Reaktor-Studie (Typ Tokamak, MATT 848, Juni 71) bei einem Plasmaradius von 170 cm und einem Maximalfeld von 160 KG berechnete maximale Zugspannung im Leitermaterial angegeben: 5000 Kp/cm^2 ! Bei großen Spulen wird also die mechanische Festigkeit der Wicklung zur physikalischen Grenze für die erreichbare Feldstärke. Durch spezielle Wicklungsstrukturen und Spulenformen läßt sich diese Grenze anheben (vgl. W. Kafka, IPP 4/70). Die im Jahr 71 entwickelten Berechnungsverfahren (siehe Jahresbericht 71, S. 217) wurden auf nicht-achsensymmetrische Belastungszustände, wie sie in toroidalen Spulensystemen vorliegen, ausgedehnt. Eine für die charakteristischen Belastungen (Lorentz-Kräfte) und Randbedingungen bei solchen Spulen bzw. Spulensystemen geeignete Airysche Spannungsfunktion konnte ermittelt werden und ermöglichte die analytische Lösung des Differential-Gleichungs-Systems für den ebenen Spannungszustand. Das Ergebnis wurde für die Berechnung der Spannungsverteilung in der W VII-Hauptfeldspule benutzt; im Fall einer Belastung, wie sie im Normalbetrieb durch das resultierende Hauptmagnetfeld und die Spulenabstüzung verursacht wird.

¹R. Pöhlchen, Ch. Ludescher: VII Symposium on Fusion Technology, Grenoble, Oktober 1972.

3.4.3 Neutronenbestrahlungen von NbTi bei 5°K

(M. Söll)

Supraleitende Magnete in künftigen Fusionsreaktoren werden energetischen Neutronen und γ -Strahlen ausgesetzt sein. Neuere Berechnungen von G.M. McCracken und S. Blow¹ zeigen, daß das integrierte Neutronenflußspektrum für den Magnetbereich eines Fusionsreaktors ähnlich dem Spektrum in der Tieftemperaturbestrahlungsanlage des Forschungsreaktors in Garching ist.

Die 1971 begonnenen Tieftemperaturbestrahlungen von NbTi wurden wiederholt und ergänzt. Bei allen Experimenten wurde eine Abnahme des kritischen Stromes festgestellt^{2,3}. Für einen blanken 11 μm dicken NbTi-Einzeldraht (Nb-50 wt % Ti) wurde eine Dosiskurve gemessen (Abb. 28). Man sieht, daß bis zu einer Neutronendosis von 10^{17} n/cm² keine nennenswerte Abnahme auftritt.

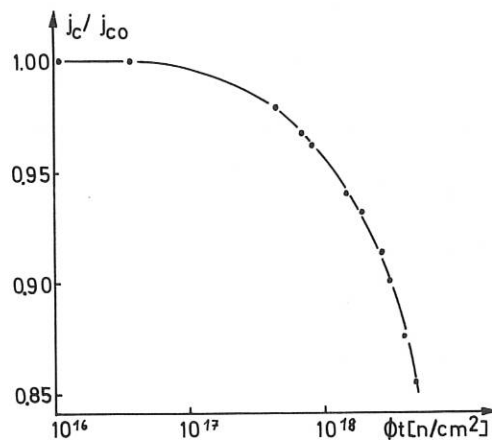


Abb. 28: Dosiskurve der kritischen Stromdichte j_c (normiert auf den Wert j_{c0} vor der Bestrahlung)

Ein weiteres Problem bei Multifilamentleitern mit Kupferstabilisierung tritt wegen der Widerstandszunahme des Kupfers durch die Strahlenschäden auf. Damit verliert das Kupfer ab einer bestimmten Dosis die stabilisierende Wirkung. In Abb. 29 ist dieses Verhalten an Strom-Spannungskurven dargestellt.

Nach einer Dosis von 4.7×10^{18} n/cm² (Kurve b) erfolgt der Übergang nicht mehr kontinuierlich und reversibel (stabilisiert) wie vor der Bestrahlung (Kurve a). Entsprechend den Bestrahlungsergebnissen dürfte nach einer Dosis von 10^{18} n/cm² eine Stromdegradation des NbTi Multifilamentleiters auf Grund der schlechteren stabilisierenden Wirkung des Cu auftreten (siehe auch ¹).

Für Ratschläge und Diskussionen sei den Herren S.L. Wipf und G. Vogl gedankt.

¹G.M. McCracken, S. Blow: CLM-R 120.

²M. Söll, S.L. Wipf, G. Vogl: Applied Superconductivity Conference, Annapolis, May 1972.

³M. Söll: VII Symposium on Fusion Technology, Grenoble, Oktober 1972.

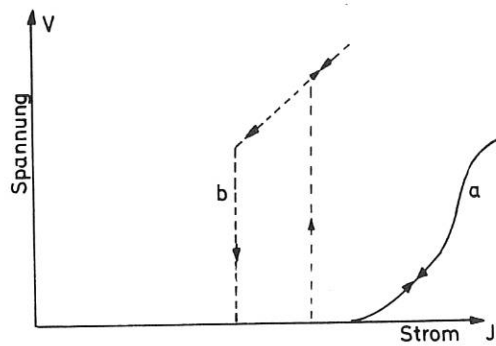


Abb. 29: Strom-Spannungskurven eines Multifilamentleiters
 a) vor Bestrahlung
 b) nach einer Dosis von $4.7 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$

3.4.4 Stabilitätsverhalten von blanken NbTi-Drähten

(M. Söll in Zusammenarbeit mit S.L. Wipf, Abt. 2)

Das Verhalten von blanken NbTi-Drähten bei sehr hohen kritischen Stromdichten bestimmt im wesentlichen die Anwendbarkeit von NbTi als Schaltermaterial. Das Schaltermaterial muß bei hohen Transportströmen stabiles Verhalten bezüglich Flußsprüngen aufweisen.

Der Supraleiter ist stabil, wenn er selbst bei Strömen oberhalb des kritischen Stromes J_c supraleitende Eigenschaften aufweist, obwohl der Strom nicht mehr verlustfrei fließt. Dieser Zustand wird als der "flux flow" Zustand bezeichnet.

Bei Supraleitern mit hohen kritischen Strömen müssen sehr dünne Drähte verwendet werden, um "flux flow" zu erreichen. Aus diesem Grund wurden Strom-Spannungskurven von blanken NbTi-Drähten (etwa 2 mm lang, 6-21 μm im Durchmesser) untersucht. In Abb. 30 sind typische Strom-Spannungskurven bei verschiedenen Magnetfeldwerten $H(H \perp j)$ für einen 11 μm dicken und

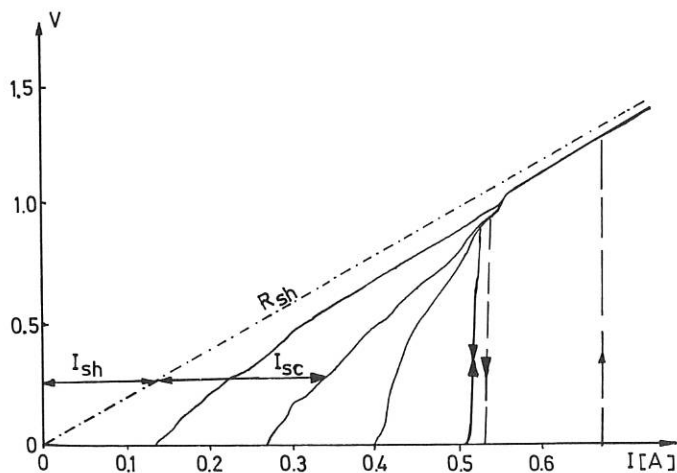


Abb. 30: Beispiele für Strom-Spannungskurven für einen 11 μm dicken NbTi-Draht (Shuntwiderstand 1.85 m Ω)

1.2 mm langen NbTi Filamentleiter dargestellt. Man sieht, daß ab etwa 2 kOe oder bei Stromdichten kleiner als $5.4 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ stabiles Verhalten auftritt (reversibler nicht sprunghafter Übergang).

Stellt man die Spannung in Abhängigkeit des Stromes im Supraleiter dar, so erhält man Kurven deren Verlauf schematisch in Abb. 31 dargestellt ist.

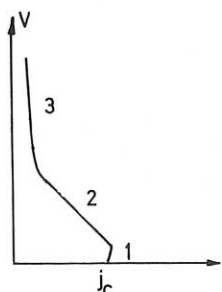


Abb. 31: Schematische reversible Spannungs-Stromkurve für supraleitenden NbTi-Draht.

Im allgemeinen können drei Bereiche unterschieden werden:

1. Bereich mit positiver Widerstandscharakteristik
2. Bereich mit negativer Widerstandscharakteristik; die Steigung wird durch den Widerstandswert des Shunts gegeben.
3. Bereich mit etwa konstanter Leistungsdissipation

Die "flux flow" Untersuchungen lassen die Vermutung zu, daß der Übergangsbereich durch einzelne "heiße Stellen" (Temperatur nahe T_c) verursacht werden kann, die längs des Drahtes wandern können.¹

3.4.5 Supraleiter in schnell veränderlichen Magnetfeldern (W. Amenda, A. Martinelli)²

Die in den letzten Jahren geleistete Arbeit wurde zusammengefaßt. Untersuchungen haben gezeigt, daß eine Abschirmung mit Nb_3Sn - Beschichtung

¹S.L. Wipf, M. Söll: ICEC 4, Eindhoven, May 1972.

²A. Martinelli: NATO-AGARD Propulsion and Energetics Panel, 39th Meeting, Colorado Springs 1972

(Plasmaspray-process) für Felder bis 10 kOe und Frequenzen bis 10 kHz vorteilhaft ist. Die Wechselstromverluste sind dabei kleiner als bei Kupfer.

3.4.6 Untersuchungen für einen induktiven Power-Crowbar Energiespeicher (W. Amenda, M. Pillsticker, H. Preis, K.H. Schmitter, M. Söll)

Die Arbeiten wurden im Juni des Berichtsjahres aufgenommen. Erstes Ziel der Arbeiten ist die Schaffung von Grundlagen für die Dimensionierung und den Bau supraleitender Energiespeicher. Induktive Energiespeicher können aus folgenden Gründen in kommenden Stufen der experimentellen Plasmaphysik und der Fusionsreaktortechnologie von Bedeutung sein:

1. Im induktiven Energiespeicher sind um einige Größenordnungen höhere Energiedichten möglich als im kapazitiven Speicher.
2. Supraleitende induktive Energiespeicher können in geeigneten Anwendungsbereichen wirtschaftlicher sein als kapazitive Energiespeicher.

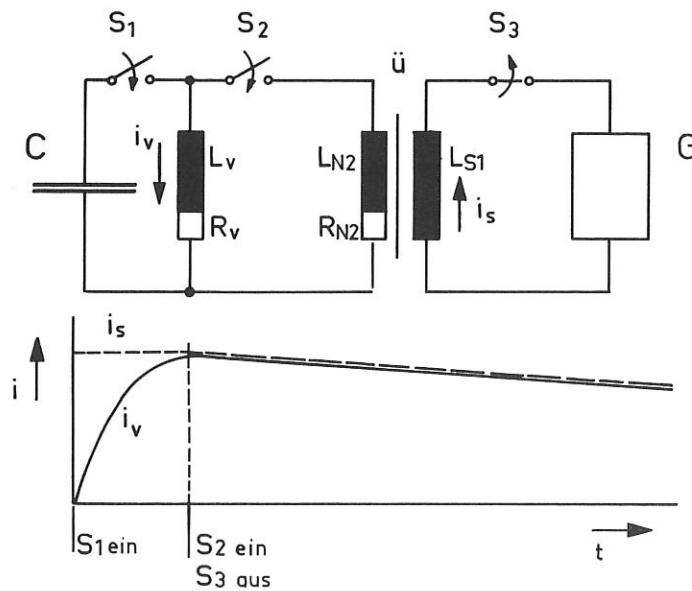


Abb. 32: Vereinfachtes Schaltbild eines kapazitiven Anstiegsenergiespeichers mit induktivem Power-Crowbar-Energiespeicher

C	kapazitiver Anstiegsspeicher ($t=0$: geladen)
L_v	Verbraucherspule
R_v	Verbraucherwiderstand
L_{S1}	Supraleitende Speicherspule (Trafo-Primärwicklung)
L_{N2}	Normalleitende Trafo-Sekundärwicklung
R_{N2}	Widerstand der Trafo-Sekundärwicklung
g	Supraleitender Generator
i_v, i_s	Stromverläufe

Eine direkte induktiv-induktive Umspeicherung ist nach der Maxwellschen Theorie nicht möglich. Eine solche Umspeicherung erfordert entweder resistive, kapazitive oder mechanische Zwischenspeicher. Mechanische und resistive Zwischenspeicher lassen nur die Übertragung von maximal 25 % der im System gespeicherten magnetischen Energie in einen induktiven Verbraucher zu. Mit kapazitivem Transfer könnten zwar bis zu 50 % der Energie auf einen induktiven Verbraucher übertragen werden, das Verfahren scheidet jedoch wegen der hohen Kondensatorkosten aus. Vollkommener Energietransfer ist nur auf kapazitive oder ohm'sche Verbraucher möglich. Deshalb wurde als erster Anwendungsfall für den supraleitenden Energiespeicher das sogenannte Power-Crowbar-System ausgewählt, bei dem der Power-Crowbar-Speicher bei geeigneter Wahl des Zuschaltzeitpunktes eine im wesentlichen ohm'sche Last sieht.

In Abb. 32 ist das Prinzipschaltbild eines Power-Crowbar-Systems mit induktivem Crowbar-Speicher gezeigt. Der noch vorhandene kapazitive Speicher, C, baut das Feld in der Verbraucherinduktivität auf. Er wird deshalb als Anstiegsspeicher bezeichnet.

Die Bearbeitung folgender Aufgaben wurde aufgenommen:

1. Entwicklung von Kryotrons a) ausschließlich für Abschaltaufgaben
b) als Ein- und Ausschalter
2. Entwicklung supraleitender Speicherspulen und hybrider Speichertransformatoren.
3. Entwicklung einer supraleitenden Erregerstromquelle für hohe Ströme (40 bis 50 kA).
4. Netzwerksuntersuchungen.

Am vordringlichsten ist die Kryotronentwicklung. Ihr soll im wesentlichen auch eine im Bau befindliche 1 kA-Speichereinheit dienen. Es sind Experimente mit verschiedenen Schaltermaterialien (NbTi Filamentleiter mit CuNi Matrix, NbTi Streifen, NbN Schichten) geplant und vorbereitet. Die Untersuchungen sollen in flüssigem, gasförmigem und im überkritischen Helium durchgeführt werden. Strömendes, überkritisches Helium besitzt im Vergleich zum flüssigen Helium für die Kryotronkühlung vermutlich Vorteile.

Theoretisch untersucht wurde das transienten Verhalten eines Versuchsschaltkreises mit S/N Ausschalter, in dem ein induktiver Speicher über einen Widerstand entladen wird. Um die während der Entladung im Schalter dissipierte Energie als Funktion einzelner Schaltparameter (Schaltgeschwindigkeit, Widerstandsverhältnis u.a.) zu bestimmen, wurde eine Fortran-Routine entwickelt. Auch das Übergangsverhalten der Ströme in einem Crowbar-Schaltkreis mit induktivem Speicher wurde ermittelt. Dabei trat der Einfluß der nicht idealen Schalter auf die Stromkommutierung und den Stromverlauf in der supraleitenden Speicherspule deutlich hervor.

Die Eignung bisher gebauter Flußpumpen wurde untersucht. Für die angestrebten hohen Ströme liegt bisher keine technische Lösung vor. Die Weiterentwicklung der Flußpumpe nach dem Leidener Prinzip ist möglich, wobei die Hauptaufgabe die Herstellung eines stabilen supraleitenden Flächenleiters sein muß. Die Verluste dieser verhältnismäßig billigen Pumpe sind groß. Verlustarme Pumpen können auf der Basis des Olsen Prinzips, mit der durch die General Electric eingeführten Schalthilfe und der von Kafka (IPP 4/90) vorgeschlagenen Parallelschaltung hergestellt werden. Die im Kryotron zu schaltenden Ströme sind dann nicht zu groß. Der einzuschlagende Weg muß vom Ergebnis der Voruntersuchungen über den Schalter abhängig gemacht werden.

4. Standardgeräte und Bauelemente

4.1 Pulsgeneratoren

(G. Klement, H. Wedler)

Als Standard-Reihe entwickelt, stehen ein- und mehrstufige Marx-Generatoren zur Verfügung. Eingesetzt wurden diese Geräte bisher zur Erzeugung von Gasentladungen (wie z.B. zum Pumpen chemischer Fluor-Wasserstoff-Laser) und zum Triggern von Funkenstrecken. Die Generatorausgangsspannung ist durch die wählbare Stufenzahl und bei Verwendung von Koaxialkabeln zur Pulsübertragung durch die Spannungsverdopplung am offenen Kabelende gegeben. Bei den bisher gebauten Generatoren (max. 5 Stufen) mit $0,1 \mu\text{F}$ -Kondensatoren beträgt die gespeicherte Energie je Stufe 80 Wsec bei 40 kV Ladespannung. Die Erweiterung der bestehenden Standardreihe auf Kondensatoren von $0,5$ und $1 \mu\text{F}$ ist in Vorbereitung.

Beschreibung: Die Kondensatoren sind nebeneinander liegend auf einer Platte angeordnet und werden über Wasserwiderstände (PVC-Schlauch mit Wasser und Kupfersulfatzusatz) geladen. Die Reihenschaltung der Kapazitäten geschieht über offene Funkenstrecken. Die Funkenstrecke der ersten Stufe wird über einen in Gießharz eingegossenen Ferritkernübertrager mit $\bar{u} = 1:2$ getriggert. Zündkreis (z.B. 15 kV-Triggergerät) und Generator sind galvanisch getrennt. Durch den einfachen Aufbau (Abb. 32) und die Wahl geeigneter Bauelemente stehen damit preisgünstige Generatoren zur Verfügung.

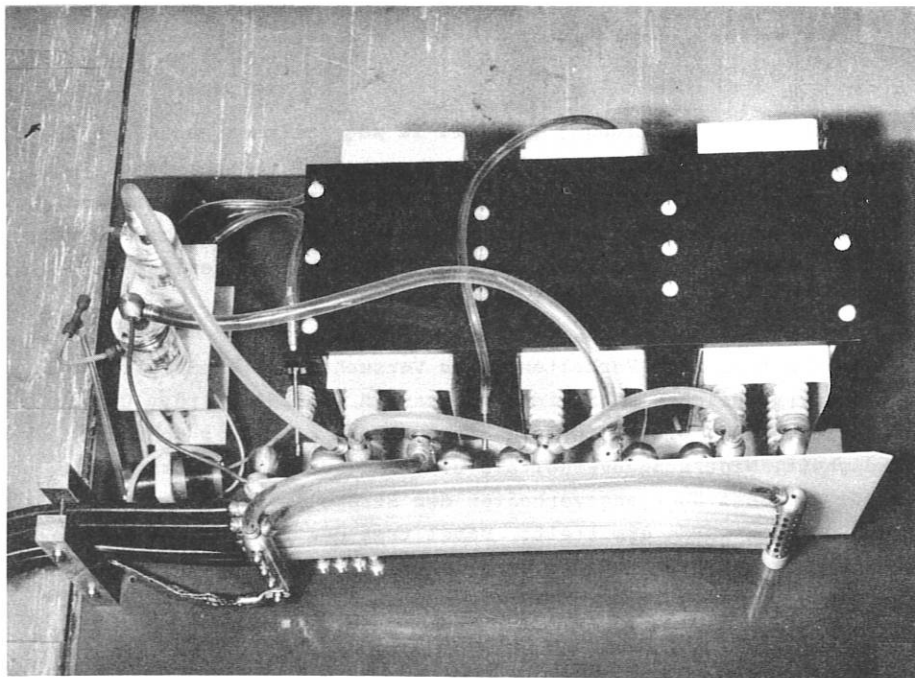


Abb. 33 Dreistufiger Standard-Marx-Generator
 Ladespannung 40 kV/Stufe; Energie 240 Ws
 Leerlaufspannung 120 kV
 Kurzschlußstrom 30 kA
 Induktivität 400 nH; Innenwiderstand $450 \text{ m}\Omega$

Daten eines einstufigen Generators mit Trennfunkenstrecke, bestückt mit 32 Kabeln, 6 m lang, Wellenwiderstand $Z = 70 \Omega$:

Ladespannung/Stufe	40 kV max
Kapazität/Stufe	0,1 μF
Eigeninduktivität	125 nH
Scheitelspannung, am offenen Kabelende gemessen	74 kV
Anstiegszeit	110 nsec
Steilheit	0,67 kV/nsec

Zeitliche Streuung und Durchlaufverzögerung zeigen Abb. 34 und 35.

Zeitliche Streuung/nS

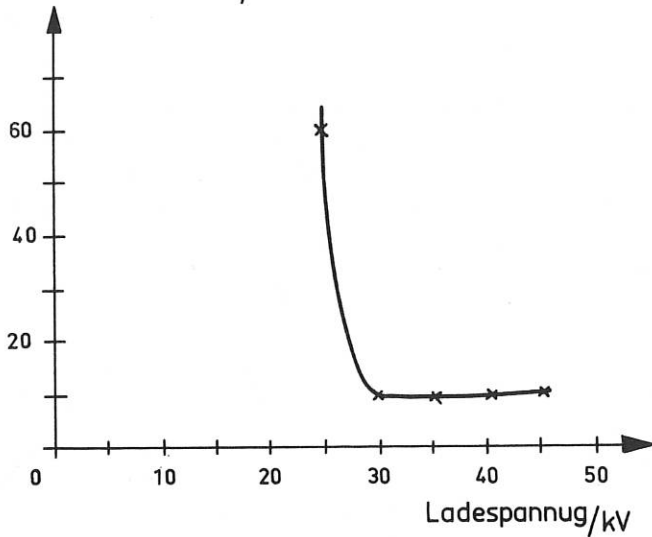


Abb. 34

Zeitliche Streuung eines einstufigen Generators in Abhängigkeit von der Ladespannung

Durchlaufverzögerung/nS

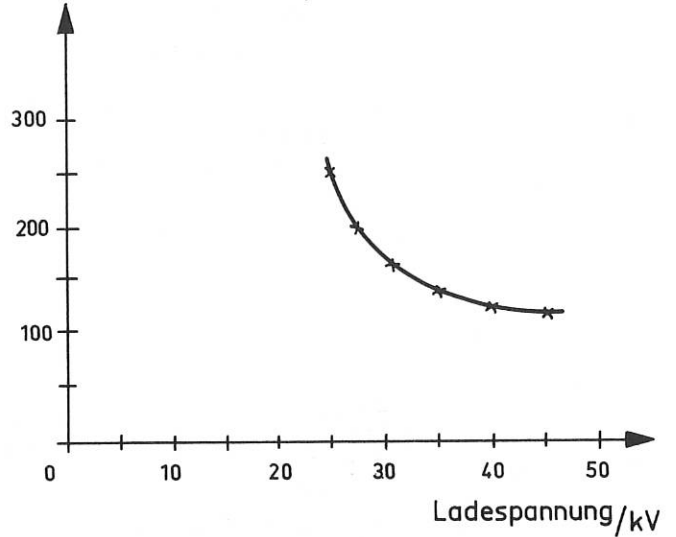


Abb. 35

Durchlaufverzögerung eines einstufigen Generators in Abhängigkeit von der Ladespannung

4.2 Koaxiale Flächenwiderstände zur Messung von hohen Stoßströmen ¹⁾

(F. Wesner)

Zur Messung hoher Stoßströme wurden koaxiale Flächenwiderstände nach Abb. 36 in zwei verschiedenen Größen ($D_i = 17,5 \text{ mm}$ und $D_i = 42 \text{ mm}$) gebaut und erfolgreich eingesetzt. Als Widerstandselement dient eine kreisscheibenförmige Folie aus Widerstandsmaterial, die vom Strom radial durchflossen wird. Die an ihr abfallende, dem Strom proportionale Spannung wird bis zu Frequenzen von über 1 GHz verzerrungsfrei abgegriffen und über ein 50- Ω -Meßkabel zum Meßgerät übertragen.

Koaxiale Flächenwiderstände bieten folgende Vorteile:

- Keine Verkettung des Meßstromkreises mit dem Magnetfeld des zu messenden Stoßstroms;
- bei symmetrischer, koaxialer Stromzuführung keine Fehler durch Laufzeiteinflüsse;
- Rein ohmscher Meßabgriff bis über 1 GHz;
- Begrenzung der Eigenanstiegszeit allein durch den Skineneffekt in der Widerstandsfolie;
- Einfacher Aufbau.

Die Belastbarkeit der Meßwiderstände wird durch die Aufheizung der Widerstandsfolie beim Stromdurchgang begrenzt. Aus Abb. 37 ergibt sich der Wert $\int i^2 dt$ des Stoßstroms in Abhängigkeit von der Foliendicke d , der in der Folie eine Temperaturerhöhung $\Delta \vartheta$ erzeugt. Der Wärme-

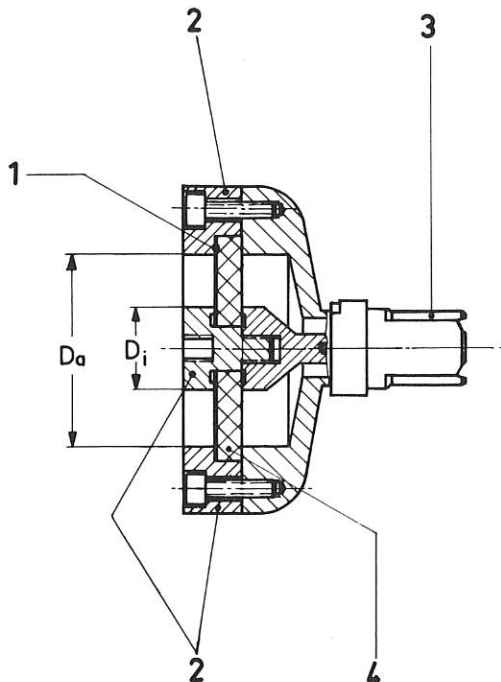


Abb. 36 Aufbau des Meßwiderstands
 1 Widerstandsfolie
 2 Stromanschlüsse
 3 Anschlußstecker GR 874 für 50 Ω -Kabel
 4 PE-Scheibe zur Stützung d. Folie

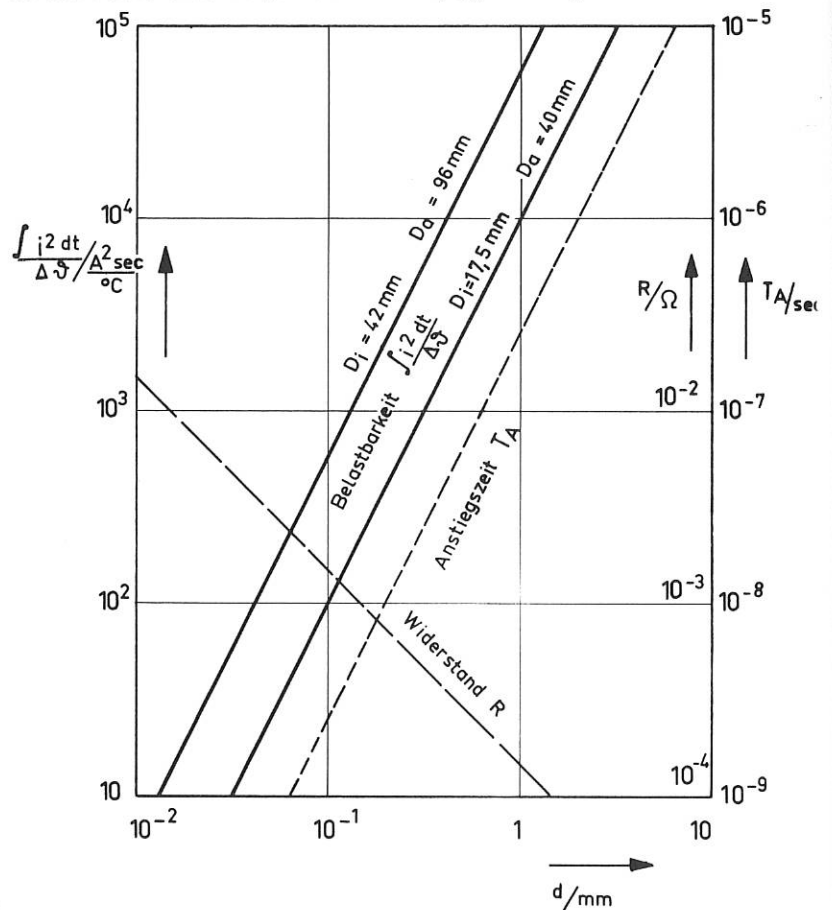


Abb. 37 Belastbarkeit, Eigenanstiegszeit und Widerstandsleistung in Abhängigkeit von der Foliendicke d

¹⁾ F. Wesner: ETZ-A 91 (1970), S.521-524

abfluß ist dabei vernachlässigt. Die zulässige Temperaturerhöhung wird durch die Stützscheibe aus PE (Abb. 36) begrenzt. Die Eigenanstiegszeit des Meßwiderstands und sein Widerstandswert sind in Abb. 37 mit eingetragen. Folien oder Bleche aus NiCr 8020 stehen in Dicken zwischen 10 μm und 2 mm in begrenzter Menge zur Verfügung.

4.3 Standmesser für flüssiges Helium

(P. Krüger)

Die handelsüblichen Standmesser sind selten an ein spezielles Experiment anzupassen, weil keine Geber unterschiedlicher Größe verwendet werden können. Deshalb wurde in Zusammenarbeit mit der Gruppe Elektronik ein Anzeigegerät entwickelt, das es ermöglicht, Heliumstände bis zu 1 m zu messen. Die Geber dürfen also eine Länge von ca. 5 bis 100 cm besitzen. Der Geber besteht aus einem 40 μm dicken NbTi-Draht, der zum Schutz gegen Zerstörung in einem dünnwandigen, mit Löchern versehenen V2A-Rohr eingespannt ist. Er taucht zum Teil in das flüssige Helium ein und ist dort supraleitend. Die bei einem Steuerstrom von 70 mA am Draht abfallende Spannung dient als Maß für den Helium-Stand. Die Empfindlichkeit beträgt 0,3 V/cm. Mit dem Anzeigegerät wird eine Meßgenauigkeit von $\pm 0,5\%$ erreicht. Die Auflösung beträgt 1 mm Heliumstand. Um das Anzeigegerät als Null-Geber verwenden zu können, wurde eine Anzeige-kompensation eingebaut. Es ist vorgesehen, das Gerät durch ein Regelteil zu erweitern, so daß es auch zum Konstanthalten des Heliumspiegels im Experiment verwendet werden kann. Der Heliumverbrauch des Gebers liegt unter 0,05 ℓ /Stunde. Das Gerät ist mit einem Schreiber-ausgang versehen.

5. Sonstige Arbeiten

5.1 Konstruktion

5.1.1 Konstruktion I

(E. Breit, N. Debudey, W. Ertl, G. Kaspar, I. Kell, M. Kluger, A. Knallinger, J. Leinthal, H. Neubauer, A. Wasner, E. Weinert, G. Wulff, H. Zickert)

Es wurden insgesamt 19.706 Stunden geleistet, die sich auf die einzelnen Abteilungen wie folgt aufteilen:

<u>Abteilung</u>	<u>Stunden</u>	<u>% der Gesamtzeit</u>
Exp. Plasmaphysik 1	4.310,0	21,9
Exp. Plasmaphysik 2	3.993,5	20,3
Exp. Plasmaphysik 3	459,0	2,3
Exp. Plasmaphysik 4	2.305,5	11,7
Relativistische Plasmen	465,5	2,4
Technik	6.413,5	32,5
Pauserei	1.634,5	8,3
Geschäftsführung und Verwaltung	124,5	0,6

Besonders erwähnenswerte Arbeiten:

Konstruktion des Belt-Pinch (Prof. Zwicker) abgeschlossen und Montagebeginn;
 Entwürfe für den neuen Kollektor des 250-kV-Belt-Pinch-Experiments (Dr. Keilhacker);
 Konstruktionszeichnungen für die 90-kJ-Testbatterie;
 Spuleneinsätze für Isar T 1;

Konstruktionsarbeiten für den elektronenstrahlkontrollierten CO₂-Laser;

Erstellen von Fertigungsunterlagen für folgende Kondensatoren:

Kondensator für schnellen 10-kJ-Puls
 Beschaltungskondensator 30 kV, 3,6 nF, 3,3 Ω
 Beschaltungskondensator 30 kV, 12 nF, 9,6 Ω;

Arbeiten am Torus mit Helix für das W VII-Projekt:

Linear-Modell 1 : 3
 Torus-Modell 1 : 4
 Entwürfe für gekühlten Torus;

Arbeiten für Gestelle zum W VII-Projekt:

Entwürfe
 Berechnung der Kräfte, Spannungen und Momente.

5.1.2 Konstruktion II

(H. Gillhuber, R. Hadersbeck, H. Hasenmiller, S. Huber, F. Kerl, H. Kotzlowski, W. Melchior, P. Meyer, G. Mühlbauer)

Es wurden insgesamt 14.811 Stunden geleistet, die sich auf die einzelnen Abteilungen wie folgt aufteilen:

<u>Abteilung</u>	<u>Stunden</u>	<u>% der Gesamtzeit</u>
Exp. Plasmaphysik 2	4.776	32,3
Exp. Plasmaphysik 3	6.267	42,3
Oberflächenphysik	3.768,5	25,4

Den größten Teil der Konstruktionskapazität beanspruchte in der ersten Jahreshälfte noch der Pulsator I (Exp. Plasmaphysik 3). Der Anteil verringerte sich aber dann, wodurch verstärkte Mitarbeit an den Stellaratoren W VII und WEGA (Exp. Plasmaphysik 2) möglich wurde. Die Abteilung Oberflächenphysik erhielt Konstruktionshilfe beim Aufbau des 2,5-MeV-Beschleunigers.

5.2 Elektronik

(R. Ammer, P. Fazekas, G. Hagl, F. Hofmeister, R. Kiesel, D. Knips, W. Melkus, G. Roos, K. Voigt, D. Zimmermann)

Die Entwicklung der Elektronik ist bestimmt durch das Vordringen digitaler Techniken und hoher integrierter Systeme. Die Einführung des PDP 11-Prozeßrechners in der Mehrzahl der experimentellen Abteilungen und in der Abteilung Technik sowie die Verwendung des CAMAC-Systems bringen eine Verlagerung auf digitale Schaltungen und auf programmgesteuerte Meß-Verfahren mit sich. Die ersten Anwendungsfälle des PDP 11 entstanden beim Erstellen von Interface-Geräten und von Betriebs- und Testprogrammen.

Die steigende Verwendung komplizierter Meßsysteme erforderte die Zusammenarbeit mit den Auftraggebern schon in der Startphase eines Projektes bei der Systemdefinition und eine Beratung beim Kauf kommerzieller Geräte und deren späterem Einsatz.

Tätigkeits-Schwerpunkte waren die Vertikalfeldversorgung für Pulsator I (siehe Abschnitt 1.) und CAMAC-Instrumentierung für die Wendelstein- und Pulsator-Experimente.

Die wichtigsten Geräte-Entwicklungen werden nachstehend beschrieben:

5.2.1 CAMAC-Modul (F. Hofmeister)

Das Gerät dient als Echtzeituhr, zum Zwischenspeichern von Soll- und Istwerten und als Ausgabeteil (48 Kontakte) für die Sollwerte im Vakuum-Steuersystem für Pulsator I. Es enthält im einzelnen in einem 3-Breiten-CAMAC-Einschub:

1. Echtzeituhr, 16 bit, setzbar, löscher, Interrupt-Ausgang, externer Takt-Eingang;
2. Register, 16 bit, schreibbar, lesbar, für CONTROL/STATUS-Zwecke;
3. 4 Register zu je 12 bit, schreibbar, lesbar, löscher, externe Ausgänge über 48 DIL-Read-Relais (Sollwerte);
4. 4 Register zu je 12 bit, lesbar, externe Eingänge TTL-Pegel (Istwerte).

5.2.2 ADC-32-Kanal-Multiplexer-Interface (D. Zimmermann)

Für den Anschluß eines 32-Kanal-Multiplexers mit Analog-Digital-Wandler (12 bit) an den Rechner PDP 11 wurde ein Interface entwickelt. Der Anschluß an den Rechner erlaubt folgende

Arbeitsweisen:

sequential mode, sequentielles Abfragen der Kanäle vom Anfangskanal bis zu einem einstellbaren Endkanal;

random mode, Abfragen der Kanäle in beliebiger Reihenfolge.

Das Abfragen der Kanäle kann entweder durch software allein oder durch software und einen externen Triggergenerator ausgelöst werden. Die zweite Methode garantiert, daß der Meßwert zu einem exakt bekannten Zeitpunkt abgefragt wird. Das Abspeichern der digitalisierten Daten geschieht per Interrupt am Ende der Konversion des Analog-Digital-Wandlers. Auf diese Art können hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten realisiert werden.

Ein anderes Teil des Interfaces sorgt für das Abspeichern des Absolutwertes der Daten (12 bit), mit Vorzeichen in einem 16-bit-Wort, sowie für ein einfaches Abfragen der an der Frontplatte eingestellten Werte per Programm.

5.2.3 DAC-4-Kanal-Interface

(D. Zimmermann)

Für den Anschluß eines 4-Kanal-Digital-Analog-Wandlers an den Rechner PDP 11 wurde ein Interface entwickelt. Der Digital-Analog-Wandler dient zur Ausgabe der im Rechner gespeicherten Digitalwerte auf ein Display. Die Ausgabe der Daten muß wegen der Einschwingzeit des Digital-Analog-Wandlers relativ langsam vor sich gehen. Daraus folgt, daß ein programmierter Datentransfer für dieses Gerät ausreicht. Im für dieses Gerät gebauten Interface können die Daten (12 bit) mit der Adresse und der Kanal-Nummer zu einem Rechnerwort (16 bit) zusammengefaßt werden. Durch zusätzliche Schaltungen wurde dafür gesorgt, daß das Timing des peripheren Gerätes mit dem des Rechners übereinstimmt.

Ferner wurden PDP 11-Assembler-Programme zum Betrieb und zum Prüfen dieser Meßsysteme erstellt.

5.2.4 Oszillografen-Display

(F. Hofmeister)

Es wurde ein Interface entwickelt, das Standard-Labor-Oszillografen zur Bildschirm-Ausgabe an die PDP 11 anschließt. Das Verfahren eignet sich zur Darstellung von Prozeßrechner-Ergebnissen direkt am Experiment. Dabei erzeugt der Rechner ein 128 x 128-Punktraster mit einer so hohen Wiederholrate (50 Hz), daß ein flimmerfreies Bild entsteht. Der Rechner ist während der Bildausgabe "dedicated". Dies erfordert auch eine schnelle Datenübertragung. Ein Speicher im Bildschirm-Gerät mit 16384 bit für das 128 x 128-Punktraster wird eingespart. Das verwendete Raster erlaubt eine gemischte Ausgabe von Grafik und Text. Bei reiner Text-Ausgabe stehen 16 Zeilen mit je 21 Zeichen, die durch Software erzeugt werden, zur Verfügung. Das Interface erfordert wenig Aufwand, da nur Multiplexer, 8-bit-Digital-Analog-Converter und Verstärker zur Ansteuerung der X, Y, Z-Eingänge des Oszillografen benötigt werden.

5.2.5 Interface für die IBM 360/91 - PCM München-Garching

(W. Melkus)

Zur Verknüpfung der IBM 360/91-Daten-Anschlußeinheit 2701 (PDA) und des vom Institut für Nachrichtentechnik der TU München gebauten Serien-Parallel-Umsetzers wurde ein halbduplex arbei-

tendes Dateninterface mit Ein- und Ausgangskanal (je 16 bit) erstellt. Die Steuereinheit für die 2 x 16 (Input-Output)-Kanäle wurde so ausgelegt, daß auch ein Anschluß an einen PDP 11-Rechner möglich ist. Ein Testen der Übertragungsleitungen ist von der IBM 360/91 oder vom PDP 11-Rechner aus in einfacher Weise möglich.

5.2.6 Hochlauf-Regelschaltung

(F. Hofmeister)

Zum Steuern der Heizleistung bei der Laser-Kristallzüchtung wurde eine digitale Ablauf-Schaltung entwickelt, die eine gemäß der Differentialgleichung $\frac{dU}{dt} = \pm \frac{C}{U}$ zeitabhängig verlaufende Ausgangsspannung liefert. Diese Steuerspannung führt zusammen mit der quadratischen Abhängigkeit der Heizleistung von der Heizspannung zu einer linearen Zu- oder Abnahme der Heizleistung, also zu einer gleichmäßigen Erwärmung oder Abkühlung der Schmelze über Stunden hinweg. Die Konstante C kann variiert werden. Stoppen und erneutes Anfahren bei gleichbleibender Steigerungsrate ist möglich.

5.2.7 Laser-Modulator

(F. Hofmeister)

Für akusto-optische Zwecke (CO₂-Laser-Modelocking) wurde ein Oszillator-Verstärker für 30 MHz \pm 300 kHz (feinregelbar) und 20 Watt Ausgangsleistung (50 Ω) entwickelt. Die HF-Leistung ist tastbar bis zu minimal 2 μ sec Pulsbreite. Über ein CLC- π -Glieder wird der Oszillator an den Schwingquarz angekoppelt.

5.2.8 36-teiliger, elektronisch gesteuerter Verbraucher

(W. Melkus)

Für Messungen an MHD-Generatoren werden an die Elektrodenpaare voneinander isolierte, variable, ohmsche Verbraucher geschaltet. Sie bestehen aus 36 stromkonstant betriebenen, wassergekühlten Transistoreinheiten, von denen jede bei $0,1 \text{ A} < I_{\text{Last}} < 5 \text{ A}$ und $10 \text{ V} < U_{\text{Last}} < 110 \text{ V}$ maximal 240 W verbrauchen kann. Durch einfachen Umbau sind pro Einheit 200 V oder 5 A bei 450 W erreichbar. Die Zahl der Einheiten beträgt dann 18. Drei voneinander unabhängige Steuerstufen erlauben für jeweils 12 (oder 6) Einheiten die beliebige Wahl zweier Grenzwerte, zwischen denen die seitlich lineare Laststromänderung nach verschiedenen Programmen automatisch erfolgen kann. Die Dauer des Überganges von einem Grenzwert zum anderen ist mit 6 Zeitstufen zwischen 0,01 und 5 sec frei wählbar. Die Steuerstufen können mit einem Triggerpuls von 10 V oder mit einer Fern Taste ausgelöst werden.

5.2.9 Laser-Energiemeßgerät

(G. Roos)

Die Energie von Laserimpulsen wird über die Erwärmung eines Leichtmetall-Konus gemessen. Änderungen der Umgebungstemperatur werden in einer Brückenschaltung ausgeglichen. Der Meßwert wird nach einer einstellbaren Verzögerungszeit von 30 - 50 sec nach dem Laserschuß abgegriffen, nachdem sich Temperaturunterschiede im Konus ausgeglichen haben. Die Eichung erfolgt über einen elektrischen Impuls, der dem Konus eine definierte Heizenergie zuführt. Der Meßwert wird ca. 20 sec zur Ablesung gespeichert.

5.2.10 Gerät zur analogen Quadrierung einer Spannung

(G. Roos)

Mit Hilfe einer integrierten Schaltung wurde ein Gerät aufgebaut, das die Quadrierung einer Spannung und die Multiplikation der Momentanwerte zweier elektrischer Größen ermöglicht.

Eingangsspannung(en): 0 ... 1 V, Ausgangsspannung: 0 ... 10 V, Multiplikationsfehler: $\leq 0,1$ % im ganzen Spannungsbereich, bei Wechselspannung ≤ 1 % bis 30 KHz.

5.2.11 Spannungsüberwachung

(G. Roos)

Bei Hochspannungsanlagen mit Einzelkondensatoren oder getrennt aufgeladenen Kondensator-Gruppen kann durch Vergleich des zeitlichen Verlaufs der einzelnen Lade- (oder Entlade-) Spannungen eine fehlerhafte Gruppe lokalisiert werden. Als Ersatz für eine vor Jahren konzipierte Anlage wurde nun das neue Spannungsüberwachungssystem EL 228 entwickelt. Besonderer Wert wurde dabei auf Unempfindlichkeit gegenüber Störspannungen aus der Hochspannungsanlage und einen möglichst einfachen Abgleich gelegt. Das Gerät ist im Baukastensystem aufgebaut und kann erweitert werden. Polarität und Amplitude der zu überwachenden Spannung sind wählbar. Der Spannungsverlauf einer wählbaren Baugruppe dient als Führungsgröße, mit der die Spannungen der anderen Gruppen verglichen werden. Durch Abweichungen > 1 % werden den einzelnen Gruppen zugeordnete Lichtzeichen und Relaiskontakte ausgelöst, die das Einleiten geeigneter Abschaltvorgänge ermöglichen. Die Anlage soll mit 100 Kanälen zur Überwachung der Vertikalfeldversorgung des Pulsators I eingesetzt werden.

5.3 Elektronik-Service

(H. Auer, H. Schneider, F. v. Woyna)

Während des Berichtsjahres wurden 620 elektronische Geräte gewartet und repariert. Ferner wurden 514 neu eingetroffene Geräte überprüft. Ersatzteilkosten und Arbeitszeit betragen DM 33.359,34 bzw. 4.566 Stunden. Diese teilen sich auf die einzelnen Abteilungen wie folgt auf:

<u>Abteilung / Kostenträger</u>	<u>DM</u>	<u>Stunden</u>
O	1.539,13	122
E 1	4.145,84	686
E 2	6.349,--	935,5
E 3	1.489,14	439
E 4	1.859,80	407
9	1.531,42	577,5
Energieversorgung	18,75	11,25
Informatik	23,24	11,25
W VII	-	13,25
TE	12.155,47	834,5
V	104,85	32,75
Externe Auftraggeber	180,97	33
Extraterr. Physik	3.961,73	462

5.4 Chemie

(K. Machold, J. Perchermeier, E. Prüfner, H. Spitzer, H. Weichselgartner)

Für 157 eingegangene Entwicklungsaufträge wurden 2.424,5 Stunden verrechnet.

5.4.1 Gaschromatographie

(K. Machold, H. Weichselgartner)

Neben Routineuntersuchungen, Reinheitskontrollen von Lösungsmitteln, Syntheseprodukten und wiederaufbereiteten Substanzen wurden die Arbeiten zur Trennung von Wasserstoff, Stickstoff und Edelgasen an Molekularsiebkolonnen fortgeführt. Kalium konnte als K-Oktoat in Kerosen quantitativ an Carbowax auf Chromosorb bei 50 - 200° C bestimmt werden.

5.4.2 Radioaktive Nickelschichten

(H. Spitzer)

Im Berichtsjahr wurden weitere HELIOS-Kalotten galvanisch mit dem Isotop Ni-63 beschichtet. Die Stromdichte wurde weiterhin bei Werten bis zu 2000 A/dm² belassen, die Expositionsdauer teilweise verkürzt. Einige Tests haben gezeigt, daß das Isotop in ausreichender Menge niedergeschlagen wird. Dabei scheint eine Isotopentrennung entlang der als Wischelektrode dienenden Kunststoffaser eine Rolle zu spielen.

5.4.3 Galvanoplastik

(E. Prüfner, H. Spitzer)

Für den Pulsator I wurden weitere Mikrowellenhörner und Übergangsstücke unterschiedlicher Abmessungen und Wandstärken aus Kupfer galvanoplastisch hergestellt. Gegen Ende des Jahres wurde ein neues Entwicklungsprojekt begonnen, nämlich einen Bleitorus von 2 mm Wandstärke und mit den Außenmaßen 60 x 150 mm auf einem Al-Kern galvanoplastisch aufzubauen. Der Al-Kern wird dann chemisch herausgelöst. Als Elektrolyt wurde ein normales Bleibad verwendet. Die in den letzten Jahren gesammelten Erfahrungen bezüglich Elektrodenanordnung, Badkorrektur, Stromdichteverteilung usw. wurden entsprechend angewandt, und so fielen die ersten Versuche bereits erfolgreich aus.

5.4.4 Allgemeine Analytik

(K. Machold, J. Perchermeier)

Die in der modifizierten Eieruhr reduzierten Metalle (Ti, Ta, V, Cu) wurden analysiert. Da dabei sehr oft die als Ausgangsmaterial verwendeten höheren Metalloxide nicht bis zum Metall, sondern nur auf eine niedrigere Oxidationsstufe reduziert werden, liegen meist Gemische verschiedener Oxide neben dem Metall vor, so daß sich schwierige Trennprobleme ergeben. Ferner wurden Aufdampf-, Abbrand- und Rückstandsanalysen im Auftrag ausgeführt. An Geräten stehen zur Verfügung: Korrosionsprüfschrank nach Kesternich, Rauigkeitsmeßgerät, Flammenphotometer, registrierendes UV-Photometer, Gaschromatograph, Atom-Absorptions-Spektralphotometer.

5.4.5 Umweltschutz

(Ph. Georgens)

Die an die Galvanik angeschlossene Neutralisationsanlage wurde weiterhin zur Entgiftung der im Chemielabor gesammelten Schadstoffe eingesetzt. Die Anlagen zur Rückgewinnung von verschmutzten Lösungsmitteln wurden aus Rentabilitätsgründen stillgelegt.

5.4.6 Präparate für den Jodlaser

(J. Perchermeier, H. Weichselgartner)

Seit einiger Zeit werden manche der für die Jodlaser verwendeten Präparate, wie beispielsweise C_3F_7J durch fraktionierte Kondensation gereinigt und so von Zersetzungs- und Polymerisationsprodukten sowie elementarem Jod befreit. Die Reinheitskontrolle erfolgt entweder an Hand des Dampfdruckverlaufes am Kondensationspunkt oder gaschromatographisch. Da diese Arbeiten künftig häufiger anfallen werden, wurde eine Glasapparatur mit vier Kondensationsfallen fest aufgebaut. Sie kann bei Bedarf so erweitert werden, daß auch Synthesen von Dijodiden (CF_2J_2 ; $C_2F_4J_2$ usw.) und fluorierten Silanen damit ausgeführt werden können.

5.5 Vakuumtechnik/Technologie

(K. Becker, R. Ehrlich, H. Fendl, G. Förster, H. Häglsperger, M. Karpfinger, G. Knöbel, E. Laser, R. Scherzer, H. Schickel, P. Schirmer, A. Stimmelmayer, F. Zitzmann)

5.5.1 Allgemeine Aufträge

Für 355 ausgeführte Aufträge wurden insgesamt 7.948,6 Stunden aufgewendet.

Für Bedienung und Wartung der Verflüssigungsanlagen für N_2 und Helium waren 3.055,5 Stunden erforderlich.

5.5.2 Klein-Wasserwächter für Magnetfeldspulen

(R. Scherzer)

Zur Überwachung des Kühlkreislaufes von Magnetfeldspulen wurden Klein-Wasserwächter entwickelt und hergestellt. Um die Ausführung einfach zu gestalten, wurden für das Schaltgehäuse handelsübliche Lötfittinge aus Kupfer verwendet. Die Arbeitsweise des Geräts beruht auf einer Prallplatte, die im Wasserstrom ausgelenkt wird. Sie betätigt einen Mikroschalter, dessen Schaltpunkt mittels Stellschraube für Ausschaltmengen von 1 bis 6 l/min einstellbar ist.

5.5.3 Aufdampftechnik

(H. Häglsperger)

1. AR-Doppelschichten zur Entspiegelung optischer Bauteile aus Quarz für die Anwendung innerhalb eines schmalen Spektralbereiches mit Restreflexion $\leq 0,3 \%$ je Fläche.
2. Reflexmindernde und reflexerhöhende Schichten auf Ge-Substraten für $\lambda = 10,6\mu$. Restreflexion ca. 1,5 - 2 % je Fläche. Spiegelschichten mit hohen R-Graden neigen wegen den relativ großen Schichtdicken mit den derzeit verwendeten Substanzen infolge hoher innerer Spannungen zur Ribbildung. Zur Zeit werden weitere Substanzen hinsichtlich ihrer Eignung für IR-Mehrschichtsysteme untersucht.

3. Weitere erwähnenswerte Aufdampfarbeiten:

Herstellen von Goldspiegeln für Laseranwendung;
 Zylinderbedampfung von Kupferzylindern mit SiO_2 ;
 Leuchtschirmbedampfung mit Pt;
 Bedampfung von Glas- und Plexiglasplatten mit Paraffin, Bi, Sb und Cd.

5.5.4 Allgemeine Werkstofftechnologie

(H. Fendl, H. Häglsperger, G. Knöbel, E. Laser)

1. Herstellung von Ba- und Eu-Kegeln

Für die Durchführung von Ionenwolken-Experimenten wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Extraterrestrische Physik durch induktives Erschmelzen im Vakuum Ba-Kegel und unter Schutzgas (Argon) Eu-Kegel hergestellt. Dazu wurde eine Stahlgießform mit einem darüber angeordneten Schmelztiegel mit Auslauftrichter verwendet. Zur Evakuierung bzw. Schutzgasführung war die Anordnung mit einer Quarzglasglocke abgedeckt. Nach Vorheizen der Gießform auf ca. 800°C (Ba) bzw. 1000°C (Eu) wurde das Material im Schmelztiegel geschmolzen (wobei die Schmelze in die Gießform ablaufen konnte), anschließend zur Homogenisierung in der Gießform noch einmal nachgewärmt und im Vakuum bzw. Schutzgasstrom abgekühlt. Das Gewicht der Gießlinge betrug bei Eu ca. 700 g, bei Ba ca. 500 g. Versuche, das Erschmelzen der Eu-Kegel ebenfalls im Vakuum durchzuführen, scheiterten am bereits in festem Zustand relativ hohen Eu-Dampfdruck, der zu Metaldampf-Entladungen sowie relativ hohen Kondensationsraten von Eu an den Wänden der Quarzglasglocke führte.

2. Glühvorschriften für rostfreie Stähle

Zur Festlegung von Glühvorschriften für das Spannungsfreiglühen rostfreier Stähle wurden Glühversuche mit anschließender Gefügeuntersuchung der Proben sowie Feststellung der Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion durch den IK-Test durchgeführt.

3. Werkstoffprüfung

Neben der laufenden Prüfung von Werkstoffen zur Ermittlung von Festigkeitswerten wurden folgende erwähnenswerte Arbeiten durchgeführt:

metallographische Untersuchung von Schweiß- und Lötverbindungen;
 Mikroschliffe und -aufnahme von supraleitenden Kontakten;
 mechanisches Feinstpolieren von Targets für Ionenbeschuss aus Cu, Mo, Be und rostfreiem Stahl;
 Herstellen von Nickel-Sinterkathoden.

6. Zentralwerkstätten

6.1 Arbeitsvorbereitung

Die Gruppe Arbeitsvorbereitung bestand 1972 aus 9 Sachbearbeitern der einzelnen Fachrichtungen und einer kaufmännischen Mitarbeiterin. Im Berichtszeitraum wurden 1911 Aufträge, die den Zentralwerkstätten übertragen wurden, bis zur Fertigungsreife bearbeitet und zusammen mit 296 Aufträgen aus dem Jahr 1971 während der Fertigung betreut. Von der Arbeitsvorbereitung wurden dafür insgesamt 14.121 Arbeitsstunden aufgewendet. Dies entspricht einem Vorbereitungs- aufwand von etwa 10 %.

6.2 Mechanische Werkstätten

6.2.1 Maschinenpark

Die Ausstattung der mechanischen Zentralwerkstätte wurde im Laufe des Jahres 1972 durch folgende zusätzliche Einrichtungen und Werkzeugmaschinen in den einzelnen Bereichen erweitert:

Mechanik:	1 Leit- und Zugspindeldrehbank	Type VDF 48S
	1 Universal-Werkzeugfräsmaschine	Type FP 2
	1 Universal-Werkzeugfräsmaschine	Type FP 1
Feinmechanik:	1 Universalfräsmaschine	Type FP 1

6.2.2 Personal

Stand	1. 1. 1972	112
Zugänge		6
Abgänge		4
Versetzungen		6
Beschäftigte	31. 12. 1972	<u>108</u>

Belegschaftsstärke der einzelnen Werkstätten
am 31. 12. 1972

Mechanik	36
Feinmechanik	10
Schlosserei und Schweißerei	15
Kunststoffwerkstatt	3
Werkzeuglager und Helfer	7
Schreinerei	7
Lehrwerkstatt	18
Werkstattbüro	1
Revision	<u>2</u>
	<u>99</u>

6.2.3 Geleistete Stunden (Mechanische Werkstätten und Schreinerei): Gesamtzahl 86.280

Abt.	O	E1	E2	E3	E4	9	TE	Sonst.	Extraterr. Phys.
vorgegebene Kapazität %	7	18	14	10	14	9	18	1	9
geleistete Stunden	9608	15130	8651	17062	6764	8316	13632	4357	2760
entspr. %	11	17	10	20	8	10	16	5	3

6.2.4 Erwähnenswerte Arbeiten

Schuko I kompl. für Einspulenkompressor zum Elektronenring-Experiment (Aufwand ca. 1460 Std.)	Dewargefäß für W VI (Aufwand ca. 1500 Std.)
4 Kühlstützen für W VI (Aufwand ca. 1920 Std.)	Cu-Mantel für Pulsator I (Aufwand ca. 4560 Std.)
Torusaufhängung für Pulsator I (Aufwand ca. 1140 Std.)	Teile zur Pumpleitung f. Pulsator I (Aufwand ca. 1120 Std.)
4 Kreuzstücke für Pulsator I (Aufwand ca. 3146 Std.)	Limiterteile für Pulsator I (Aufwand ca. 820 Std.)
Lasertisch mit Justiervorrichtung (Aufwand ca. 955 Std.)	Stromstütze für W VI (Aufwand ca. 752 Std.)
Funkenstreckenteile für Belt-Pinch II (Aufwand ca. 900 Std.)	Montage des Torus an Isar I (Aufwand ca. 740 Std.)
Wasserverteiler für Pulsator I (Aufwand ca. 650 Std.)	Montagearbeiten am Pulsator I (Aufwand ca. 2500 Std.)
Tisch für Belt-Pinch II (Aufwand ca. 300 Std.)	4 Schalkabinen für Belt-Pinch II (Aufwand ca. 315 Std.)

6.3 Zentrale Elektrowerkstatt

Geleistete Stunden bei einer Belegschaft von 14 (ab April 13) Facharbeitern: 17.942

Abt.	O	E1	E2	E3	E4	9	TE	Sonst.	Extraterr. Phys.
vorgegebene Kapazität %	7	18	14	10	14	9	18	1	9
geleistete Stunden	481	2566	662	5774	2441	239	1182	3941	656
entspr. %	2,7	14,3	3,7	32,2	13,6	1,3	6,6	22	3,6

Im Berichtsjahr wurden 222 Aufträge bearbeitet bzw. abgeschlossen. Es wurden u.a. folgende Geräte und Anlagen erstellt:

Kondensator-Batterien sowie kompl. Steuerungs- und Ladeeinrichtung für Pulsator I; Ladegeräte und Kabel für Belt-Pinch; Laser-Doppelbatterien; Zündgeräte für Kaskaden-Lichtbogen; Trigger-Beschaltungseinheiten; Heizgeräte für Magnetron; Einstufige Triggergeneratoren; Marx-Generatoren; Kabelwannen; Kurzschließer; Ladesysteme; diverse Hochspannungs-Lade- und Netzgeräte; Netz- und Notstromverteiler für Experimente.

Seriengeräte für das Elektrolager: Impulsgeneratoren 15 kV; Hochspannungs-Ladegeräte 40 kV; Impulstransformatoren; diverse Netzverteiler-Einschübe.

Sonstiges: Transformatoren, Drosseln und Stromwandler; Hochspannungs-Kondensatoren; diverse Steuerungen; Hochspannungs-Stecker und -Schalter bis 70 kV; Druckluft-Kurzschließer; Trigger-, Steuer- und Netzkabel; Installationsarbeiten; Reparaturen sowie verschiedene mechanische Arbeiten.

Mit Jahresende wurden 38 Aufträge in Höhe von ca. 7.211 Arbeitsstunden auf 1973 übertragen.

6.4 Zentrale Elektronik-Werkstatt

Anzahl der beschäftigten Facharbeiter (ausgenommen im Februar: 8) im Berichtsjahr: 7.

Geleistete Stunden	für Einzelfertigung	6.704,0
	für Serienfertigung	2,654,0
	Werkstattstunden	<u>459,5</u>
	Gesamtstunden	<u>9.817,5</u>

Abt.	O	E1	E2	E3	E4	9	TE	Sonst.	Extraterr. Phys.
vorgegebene Kapazität %	7	18	14	10	14	9	18	1	9
geleistete Stunden	766,5	128	550	3170	57,5	398	1483,5	2760,5	44
entspr. %	8,2	1,3	5,9	33,9	0,6	4,2	15,9	29,5	0,5

Es wurden 163 Aufträge bearbeitet und abgeschlossen. In Einzelfertigung wurden u.a. gebaut und ausgeliefert:

Regler-Bausteine und Hilfseinrichtungen (Hilfsspannungserzeugung, Steuereinrichtungen) für Stromversorgung des Vertikalfeldes am Pulsator; Gerät zur analogen Quadrierung einer Spannung; Verbindungskabel für Rechenanlage; Steuergerät für Impulszähler; Impulsversorgungsgeräte; Präzisions-Spannungsüberwachung mit Meßwiderständen; Computer-Interface-Geräte; Heizstromversorgung; Stromversorgung für Elektronen- und Ionenquelle; Bildwandler-Einschübe; Bildwandler-Köpfe; Bildwandler-Speisegeräte; μ sec-Schmierbild- μ sec-3-Bild-, 7-Bild-Einschub; Flüssigkeitsstand-Meßeinrichtung; Steuereinschub für Nachfüllautomatik; Emissions-Konstanthalter; Entladungsröhre für TEA-Laser; Hochspannungsgerät 5 kV/20 W; Hochspannungs-Überwachungsgeräte; Timer; Multipliere-Köpfe; Trennverstärker mit optischem Koppler; Impulsgenerator 0 - 100 Hz; Heizstromversorgung.

In Serienfertigung wurden nachstehende Standard-Geräte mechanisch und elektrisch auf den neuesten Stand gebracht (z.B. auf 19"-Istep-System umgestellt) und geliefert:

Triggergerät 7,5 kV, Triggergerät 14 kV, Speisegerät 7,5 kV, Speisegerät 14 kV, Triggergerät 3,2 kV, Speisegerät 3,2 kV, Taktgeber 4 x 0.1 - 100 sec, Spannungswächter, Optische Kopplung, Doppel-Triggergerät, Netzgerät 20 V/20 A, Lite-Mike, Netzgerät 50 V/2 A, Konus-Kalorimeter, 3,2 kV-Triggergerät 40 Hz, Impulsverzögerungsgerät 100 ns - 110 ms, Ladungs-Überwachung, Laser-Warnanlage, Laserbatterie-Fernsteuerung, Impuls-Zähler, 12-Kanal-Temperatur-Überwachungsgerät, Hochspannungs-Indikator.

Außerdem wurden in Eigenfertigung 107 Transformatoren berechnet und gefertigt und 149 Spulen verschiedenster Art gewickelt. Auch die Ätz- und Fotoarbeiten wurden noch mehr ausgebaut (1978 Platinen geätzt, versilbert und mit Lötack versehen). Es wurden 547 Filme umkopiert und entwickelt. Weiter wurden Schalt- und Bestückungspläne, Zeichnungen für mechanische Bauteile und Meßgeräte-Skalen gezeichnet und umkopiert. Für diese Arbeiten wurden folgende photographische Verfahren angewendet: Kontaktkopien, Vergrößerungen, Verkleinerungen, Kontur- und Rasterarbeiten.

6.5 Galvanik

Für 540 Aufträge wurden 3014 Stunden abgerechnet.

Besonders erwähnenswerte Arbeiten waren:

2,5 m lange Rohre aus V2A innen schwarz vernickeln;
 W VI-Ringteile (ϕ 1,4 m) elektropolieren bzw. eloxieren;
 1 m lange Al-Elektroden eloxieren bzw. elektropolieren (da die Abmessungen dieser Werkstücke die Wannengröße weit übersteigen, gestaltete sich die Bearbeitung besonders schwierig);
 Gießformen innen hartverchromen;
 Al-Teile für Fernsehkamera und Pulsator I eloxieren, vernickeln und verchromen;
 Kühlplatten schwarzfärben;
 Reflektoren aus Cu und Al elektropolieren;
 Cu-Schalen elektropolieren und hochglänzend verkupfern.

6.6 Glasbläserei-Werkstatt

Für 140 Aufträge wurden insgesamt 2260 Stunden abgerechnet. Von den gefertigten Apparaturen bzw. Bauteilen sind folgende besonders zu erwähnen:

Glaspumpstand für die Ionenquelle eines Ionenrastermikroskops;
 Gasküvetten für chemische Laser;
 Aufbereiter und Abscheider für Wirbelschicht-Trennverfahren;
 Keramikteile für Energiespektrometer.

GESCHÄFTSFÜHRUNG UND VERWALTUNG

Das Geschäftsjahr umfaßt die Zeit vom 1. Januar bis 31. Dezember 1972.

Organisatorischer Aufbau des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik

Das am 28. Juni 1960 als gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung gegründete Institut für Plasmaphysik wurde gemäß den Beschlüssen des Senats der Max-Planck-Gesellschaft und der Gesellschafterversammlung des IPP vom 16.12.1970 ab 1. 1. 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 bisher bewährten Struktur und Handlungsfreiheit des Instituts in vollem Umfang Rechnung.

1.) Kuratorium

An die Stelle des bisherigen Verwaltungsrates und der Gesellschafterversammlung trat das Kuratorium, dem nach der Institutssatzung eine unterstützende, nach dem Willen der Satzungsgeber aber auch eine allgemeine Aufsichts- und Entscheidungsfunktion zukommt:

Das Kuratorium berät mit der Geschäftsführung und der Wissenschaftlichen Leitung das wissenschaftliche Programm und die daraus sich ergebenden Folgen für den Wirtschaftsplan. Nach Abschluß der Haushaltsverhandlungen mit den Finanzierungsträgern stellt das Kuratorium den Haushaltsplan fest und tritt insoweit an die Stelle des Senats der Max-Planck-Gesellschaft. Seit dem Geschäftsjahr 1972 sind Mitglieder des Kuratoriums:

Professor Dr. Reimar LÜST,

als Präsident der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.,
München;

Staatssekretär Hans-Hilger HAUNSCHILD,

als vom Bundesminister für Bildung und Wissenschaft entsandter Vertreter;

Ministerialdirigent Hugo EICK-KERSSENBROCK,

als vom Bundesminister der Finanzen entsandter Vertreter;

Ministerialdirektor Dr. Henning Freiherr von STRALENHEIM,

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;

Ministerialdirigent a.D. Dr. Alexander HOCKER,

Generaldirektor der Europäischen Organisation für Weltraumforschung,
(ESRO), Frankreich.

2.) Fachbeirat

Zur Beratung des Instituts in allen wissenschaftlichen Fragen ist die Bildung eines Fachbeirats vorgesehen, der aus 6 bis 12 Wissenschaftlern bestehen soll, die nicht dem Institut angehören.

3.) Wissenschaftliche Leitung

Professor Dr. Arnulf S C H L Ü T E R ,
Vorsitzer und Wissenschaftlicher Direktor;

Professor Dr. Ewald F Ü N F E R ,
stellvertretender Vorsitzter;

Dr. Gerhart von G I E R K E ;

Dr. Günter G R I E G E R ;

Professor Dr. Friedrich H E R T W E C K ;

Professor Dr. Dieter P F I R S C H ;

Dipl.-Ing. Karl-Heinz S C H M I T T E R ;

Dr. Siegbert W I T K O W S K I ;

und Dr. Marcel S A L V A T ,
für die Assoziation EURATOM - IPP

4.) Geschäftsführung

Professor Dr. rer. nat. Arnulf S C H L Ü T E R ,
wissenschaftlicher und technischer Geschäftsführungsbereich;

Dr. jur. Ernst-Joachim M E U S E L ,
kaufmännischer und administrativer Geschäftsführungsbereich.

5.) Euratom

Auch im Berichtszeitraum wurden die Arbeiten wiederum unter Beteiligung von Wissenschaftlern und Technikern der Europäischen Atomgemeinschaft durchgeführt. Im März 1972 trat ein neuer Assoziationsvertrag für die Jahre 1971 - 1975 in Kraft. Danach beteiligt sich EURATOM an den gemeinsamen Aufwendungen für die Durchführung des allgemeinen Forschungsprogrammes mit etwa 24 %, an einigen vorrangigen Investitionen mit etwa 44 %.

Die Verbindung zu den übrigen Assoziationspartnern von EURATOM wurde - insbesondere auf dem Wege über die "Groupe de Liaison" und das "Comité des Directeurs" - weitergeführt.

Im Berichtszeitraum trat ferner der "Vertrag zum Austausch von Forschungspersonal" in Kraft. Darin verpflichtet sich jeder Assoziationspartner, Forschungspersonal der anderen Assoziationspartner zur Mitwirkung an den Arbeiten im Rahmen seines Assoziationsvertrages aufzunehmen. Die Kommission erstattet dem entsendenden Assoziationspartner die Fahrtkosten, Tagegelder und sonstige Aufwendungen gemäß der bei ihm geltenden Regelung. Das Institut entsandte in diesem Rahmen je einen Mitarbeiter nach Culham und Fontenay-aux-Roses, während ein Wissenschaftler aus Fontenay-aux-Roses aufgenommen wurde.

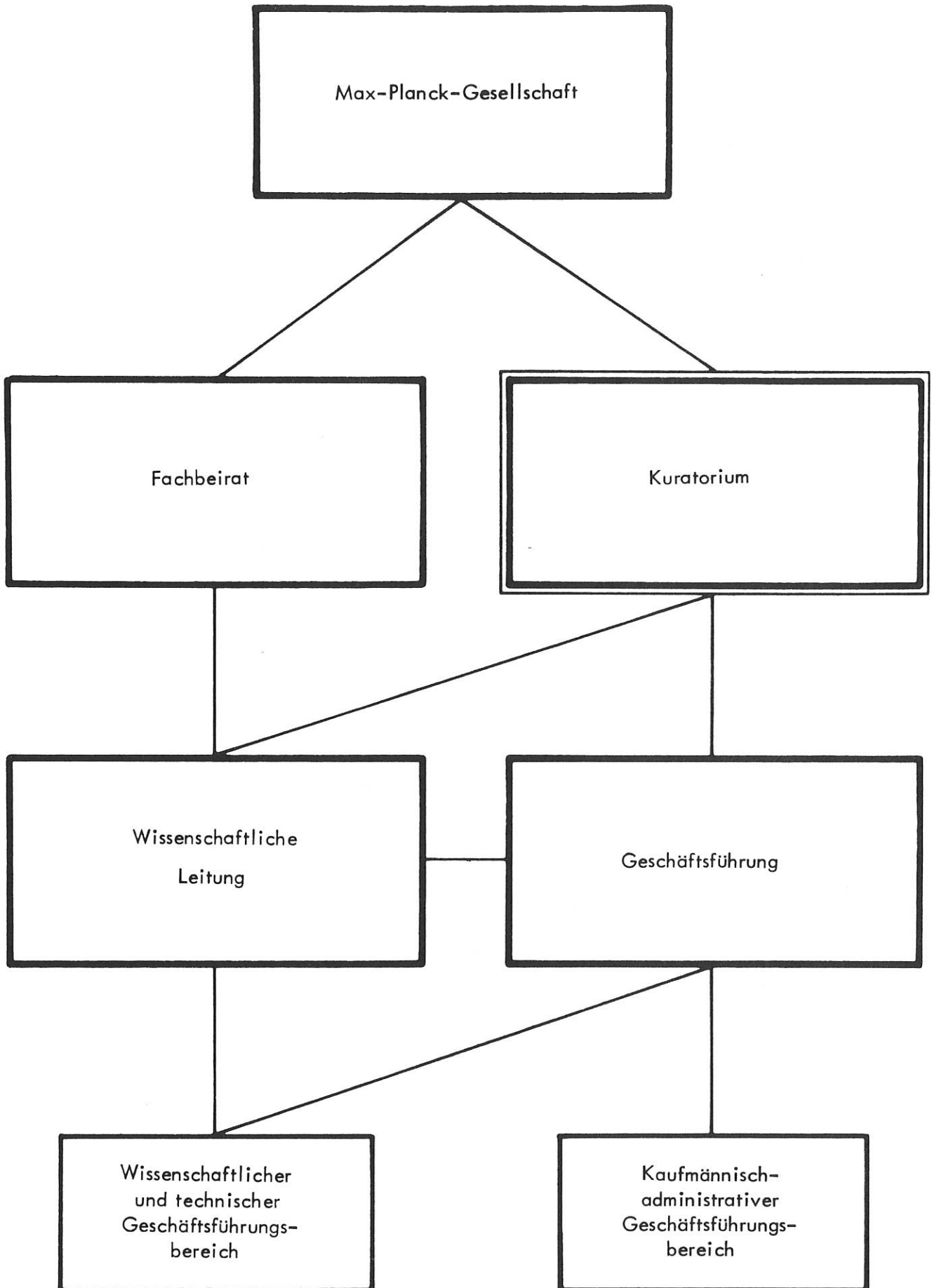


Abb. 1

Wissenschaftlicher und technischer
Geschäftsbereich

Sekretariat

259

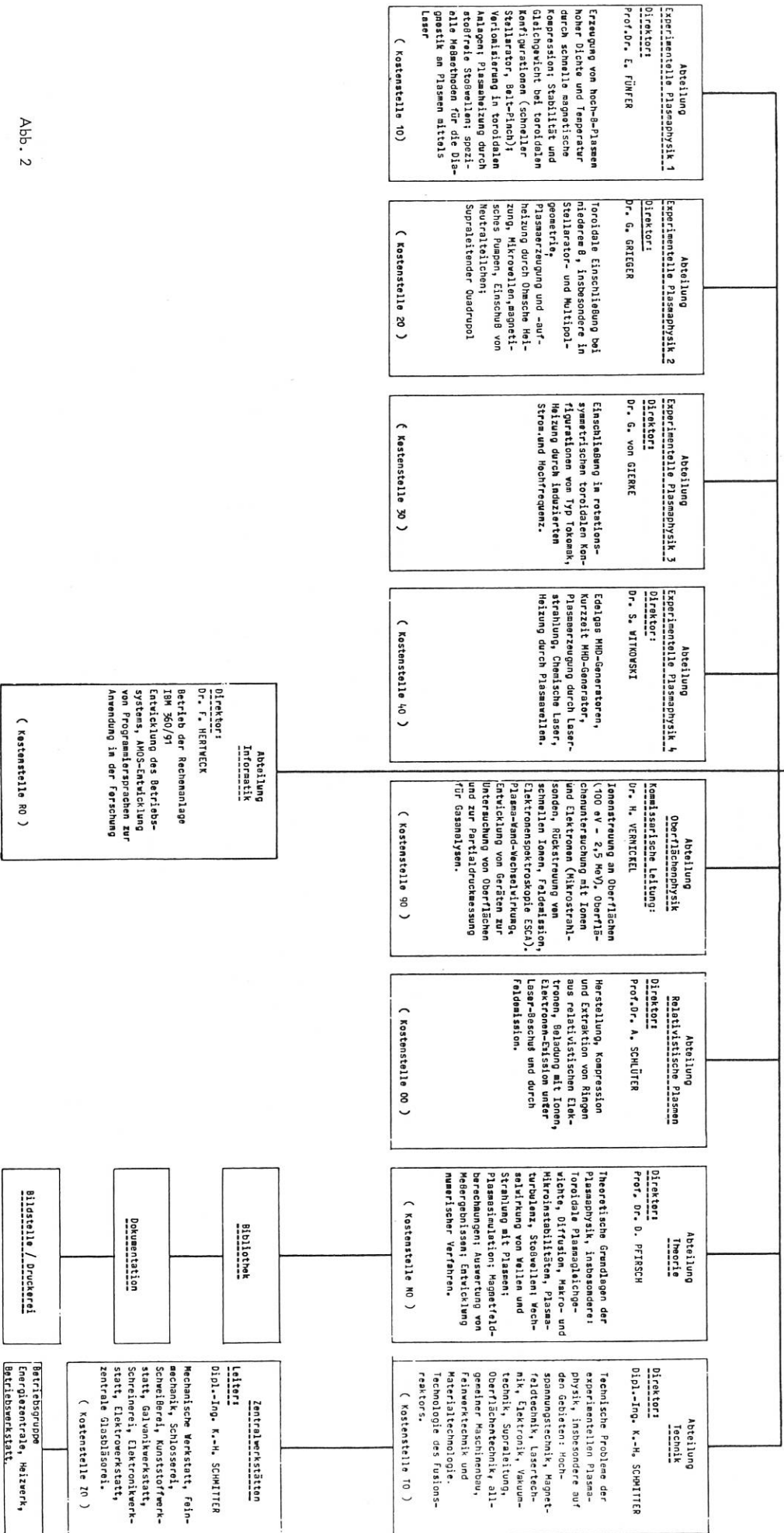


Abb. 2

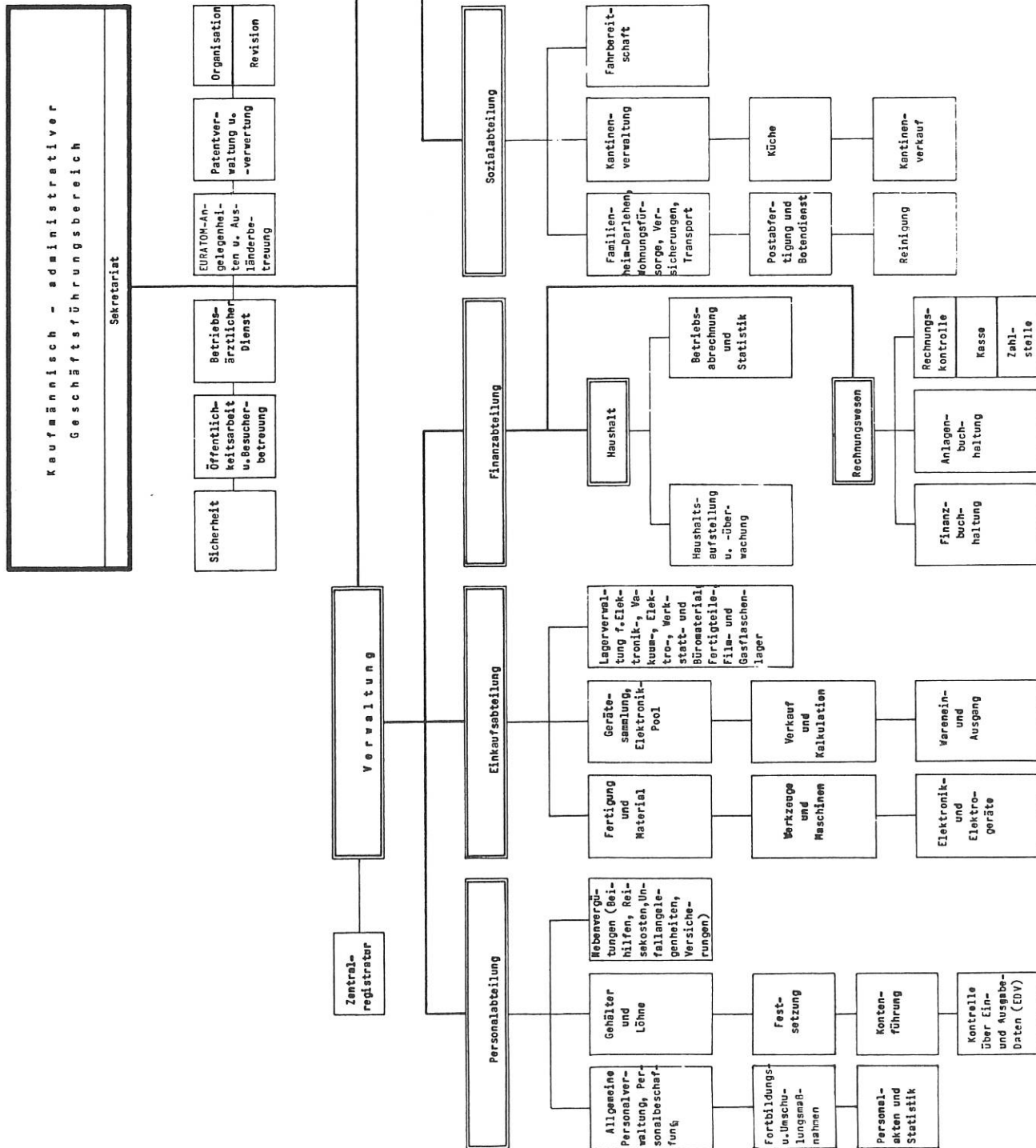


Abb. 3

6.) Verwaltung und Allgemeine Dienste

(Leitung: Adolf ILSE)

Der Bereich "Verwaltung" umfaßt die Personal-, die Einkaufs- und die Finanzabteilung, die "Allgemeinen Dienste", umfassen die Sozial- und die Bauabteilung.

a) Personalabteilung

(Dr. Helmut ZEITTRÄGER)

Ein wesentlicher Teil der Arbeit der Personalabteilung ergab sich im Kalenderjahr 1972 aus zahlreichen Tarif- und Gesetzesänderungen.

So wurden zum 1. Januar 1972 die Bezüge der Angestellten und Arbeiter um 4 % sowie um einen Sockelbetrag von DM 30,-- monatlich angehoben, wodurch sich eine effektive tarifliche Erhöhung zwischen 5 und 8 % ergab.

Die nach dem M-Tarif vergüteten Arbeiter erhielten ab 1. Februar 1972 eine tarifliche Erhöhung von 7,5 %.

Zum 1. 10. 1972 trat die dritte Stufe der Einführung des Monatstabellenlohnes für die Arbeiter des Bundes in Kraft. Dies bedeutete gleichfalls eine Anhebung der Löhne um durchschnittlich 2,2 %.

Aufgrund des "Ersten Gesetzes zur Vereinheitlichung und Neuregelung des Besoldungsrechts in Bund und Ländern" vom 18. 3. 1971 in Verbindung mit dem Tarifvertrag vom 15. 3. 1971 erhielten die Arbeiter und Angestellten bis zur Vergütungsgruppe BAT II a einschließlich ab 1. 5. 1972 eine monatliche Zulage in Höhe von 20,-- , 34,-- bzw. 50,-- DM. Diese "allgemeine Zulage" wurde mit Wirkung vom 1. Juli 1972 auf 40,-- , 67,-- bzw. 100,-- DM erhöht. Angestellte, denen bereits eine "Techniker-" oder "Programmierzulage" in Höhe von monatlich 145,-- DM gewährt wurde, erhalten diese allgemeine Zulage nicht.

Nach dem Tarifvertrag zur Änderung und Ergänzung der Anlage 1 a zum BAT vom 15. Juni 1972 wurden die Tätigkeitsmerkmale für die Angestellten in den technischen Berufen neu gefaßt. Dieser Tarifvertrag führte ab 1. Juli 1972 zu zahlreichen Höhergruppierungen bei den graduierten Ingenieuren und Technikern.

Am 19. Januar 1972 trat das neue Betriebsverfassungsgesetz in Kraft. Es brachte eine Reihe von zusätzlichen Aufgaben für die Personalabteilung, da das Gesetz die Informationsrechte des Betriebsrats und die Auskunftspflicht des Arbeitgebers im personellen Bereich nicht unerheblich erweiterte.

Ein weiterer Teil der Arbeit der Personalabteilung erstreckte sich auf die Bearbeitung von Neueinstellungen, Höhergruppierungen und Kündigungen. Vom 1. 1. 1972 bis 31. 12. 1972 ist die Anzahl der Beschäftigten von 1086 um 13 auf 1073 abgesunken. Das entspricht einem Rückgang von 1,2 % des Gesamtpersonals. Der Personalarückgang ist allerdings nur bei den außerhalb des Stellenplans Beschäftigten zu verzeichnen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß ausscheidende Mitarbeiterinnen im Reinigungsdienst nicht mehr ersetzt werden und einige Stipendiaten als wissenschaftliche Angestellte übernommen wurden.

Betrachtet man die Austrittsfluktuation der Planstelleninhaber im Institut getrennt (vgl. nachfolgende Übersicht), so ist diese relativ gering und schwankt auch innerhalb der verschiedenen Berufs- und Vergütungsgruppen. Auffallend ist dabei, daß die Austrittsfluktuation insbesondere bei den technischen Angestellten (Verg. Gruppe BAT II a T bis BAT V a) mit 3,1 % sehr niedrig ist.

<u>1. 1. 1972 - 31. 12. 1972</u>		Ist-Stand 1.1.1972	Austritte in Zahlen	% von Sp. 1
Gruppe 1 = wiss. Angestellte	AH 4 - BAT I a	73	-	-
Gruppe 2 = wiss. Angestellte	BAT I b - BAT II a	126	10	7,9 %
Gruppe 3 = techn. Angestellte	BAT II a T - BAT V a	128	4	3,1 %
Gruppe 4 = techn. Angestellte	BAT V b - BAT VI b	191	13	6,8 %
Gruppe 5 = techn. Angestellte	BAT VII - BAT X	29	3	10,3 %
Gruppe 6 = Verw. Angestellte	S - BAT V b	34	1	2,9 %
Gruppe 7 = Verw. Angestellte	BAT V c - BAT X	75	7	9,3 %
Gruppe 8 = Facharbeiter	MO-MIII, MTB I - IV	210	14	6,6 %
Gruppe 9 = ungel. Arbeiter	MIV-M VI MTB V - VIII	39	9	23,0 %
		905	61 =	6,7 %

Gruppen									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	Gesamt:
-	1	2	4	-	-	1	9	3	20
-	-	-	1	-	-	-	-	-	1
-	1	1	4	-	-	1	-	1	8
-	-	-	-	-	-	2	2	-	4
-	7	1	3	2	1	2	3	5	24
-	1	-	1	1	-	1	-	-	4
-	10	4	13	3	1	7	14	9	61

Abgang / wohin

Ausscheiden aus dem Berufsleben
 verstorben
 an UNI / wiss. Institute
 staatl./kommunal. Stellen
 sonst. Stellen / auch unbekannt
 Ausland

Gruppen									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	Gesamt:
-	2	-	1	1	-	2	2	3	11
-	1	1	1	-	-	-	9	-	12
-	-	-	5	-	-	2	2	-	9
-	1	3	4	1	-	2	-	3	14
-	1	-	1	-	-	1	-	3	6
-	-	-	1	1	-	-	1	-	3
-	5	-	-	-	1	-	-	-	6
-	10	4	13	3	1	7	14	9	61

Grund für den Wechsel

Finanzielle Verbesserung
 Berufliche Weiterbildung
 Bessere Aufstiegsmöglichkeiten
 Sonstige persönliche Gründe
 Rentenbezug / verstorben
 Ohne Angabe von Gründen
 Kündigung durch IPP bzw. keine Vertragsverlängerung

Der absolute Neuzugang betrug 1972 jedoch 175 Beschäftigte (16,1%), weil im gleichen Zeitraum 188 Mitarbeiter das Institut verließen.

In der Zahl von 1073 Mitarbeitern sind 11 Gastforscher, 11 Diplomanden, 16 Stipendiaten, 17 Lehrlinge, 13 Zeithilfen, 60 Reinigungskräfte und 32 Personen im Küchen- und Kantinendienst enthalten, die ohne Anrechnung auf den Stellenplan beschäftigt werden.

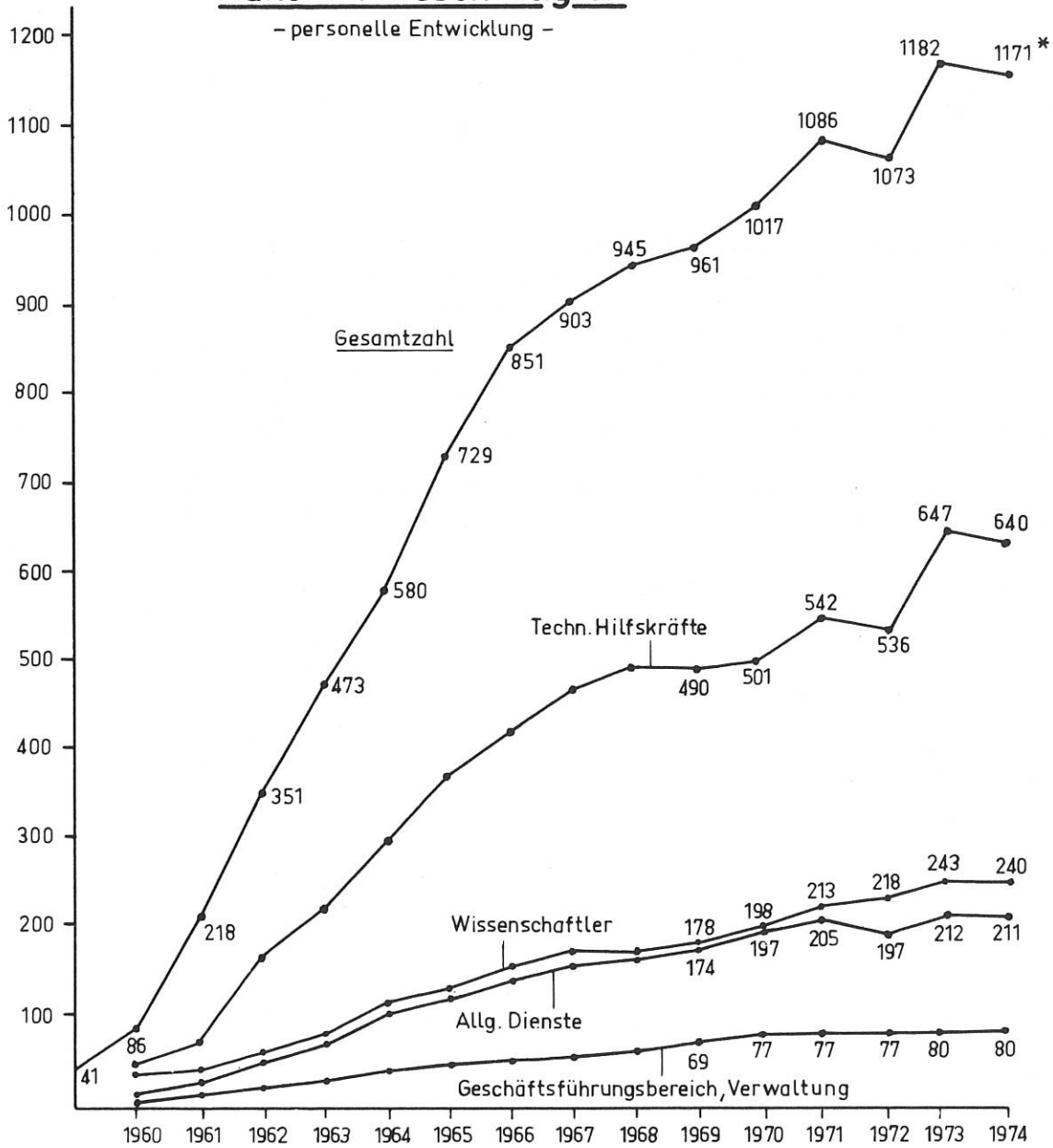
Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die personelle Entwicklung seit Gründung des Instituts bis 1972 (Stellen-Ist). In der Gesamtzahl enthalten sind Lehrlinge, Zeithilfen, freie Mitarbeiter, Nachtwachen und Diplomanden. Die für 1973 angegebenen Zahlen entsprechen dem beantragten Wirtschaftsplan 1974 (Stellen-Soll).

Bereits vor Inkrafttreten des Betriebsverfassungsgesetzes, das in § 93 die innerbetriebliche Stellenausschreibung zur Pflicht gemacht hat, wurden im Institut freie Stellen innerbetrieblich ausgeschrieben. Im Laufe des Jahres 1972 wurden zwischen Geschäftsführung und Betriebsrat Richtlinien über das formelle Verfahren erarbeitet, die allen Mitarbeitern zugestellt wurden.

Im Rahmen der Bemühungen des Instituts, die Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter zu verbessern und die innerbetriebliche Fortbildung zu intensivieren, wurden im Februar unter Kostenbeteiligung durch das Institut und in Zusammenarbeit mit der Volkshochschule Garching Fremdsprachenkurse in Englisch, Französisch und Russisch für Anfänger aufgenommen und als Fortgeschrittenenkurse weitergeführt. Die Kurse wurden von ca. 200 Teilnehmern besucht. Diese und andere Aktivitäten auf dem Gebiet der Fortbildung sollen in den kommenden Jahren fortgeführt und verstärkt werden.

Zahl der Beschäftigten

- personelle Entwicklung -



* Gegenüber dem Stellensoll 1973 wurden für 1974, 11 Planstellen gestrichen.
14 Planstellen, die im Stellensoll 1974 enthalten sind, wurden zum 31.12.1973 gesperrt.

Abb. 4

b) Finanzabteilung

(Dipl.-Kaufmann Karl Salow)

Das Haushaltsvolumen des Instituts für das Jahr 1972 war im Wirtschaftsplan auf 72,5 Mio DM festgelegt worden, deren Finanzierung wie folgt geplant war:

Eigene Erträge	11,2 Mio DM
EURATOM	20,7 Mio DM
Bund	36,5 Mio DM
Freistaat Bayern	4,1 Mio DM
	<u>72,5 Mio DM</u>

Gegenüber der im Wirtschaftsplan vorgesehenen EURATOM-Beteiligung von 20,7 Mio DM (das sind 33 % der Aufwendungen des gemeinsamen Forschungsprogrammes) ergab sich aufgrund des im März 1972 unterzeichneten Assoziationsvertrages EURATOM/IPP für die Jahre 1971 - 1975 eine EURATOM-Beteiligung von lediglich 13,9 Mio DM (= 21,5 %). Somit konnten Aufwendungen in Höhe von 6,8 Mio DM nicht finanziert werden, da sowohl der Bund als auch der Freistaat Bayern nicht in der Lage waren, entsprechende Mehrmittel zu bewilligen. Es war daher nicht möglich, den Stellenplan voll auszunützen. Einsparungen wurden durch Verzögerung von Konstruktion und Fertigung großer Experimentieraufbauten und der Lieferung der dazugehörigen Diagnostikgeräte vorgenommen. Weitere Einsparungen wurden dadurch erzielt, daß die vorgesehene Vergrößerung der Zentralwerkstatt noch nicht begonnen wurde.

Neben der Grundfinanzierung durch Bund, Freistaat Bayern und EURATOM hat das Institut für Arbeiten zur Erstellung baureifer Unterlagen für einen MHD-Kurzzeitgenerator einen Zuschuß von 458.000,-- DM erhalten.

Die Ausgaben im Berichtsjahr setzen sich - verglichen mit dem Vorjahr - wie folgt zusammen:

	1971 TDM	1972 TDM
Personalaufwendungen	27.412,9	30.128,0
Sachaufwendungen	13.878,3	13.504,2
Betriebsaufwand	41.291,2	43.632,2
Laufende Investitionen	11.455,9	13.182,7
Investitionen nach Plan	15.338,4	10.867,8
Summe Investitionen	26.794,3	24.050,5
Gesamtaufwendungen	<u>68.085,5</u>	<u>67.682,7</u>

Die Finanzierung wurde wie folgt vorgenommen:

1. Zuschuß des Bundesministeriums für Bildung und Wissenschaft	35.143,1	36.487,2
2. Zuschuß des Freistaates Bayern	3.901,1	4.054,1
3. EURATOM-Zuschuß	7.392,3	13.852,4
4. Zuschuß für Sonderprojekte	1.067,2	458,0
5. Eigene Erträge	20.581,8	12.831,0
	<u>68.085,5</u>	<u>67.682,7</u>

ENTWICKLUNG DER AUSGABEN

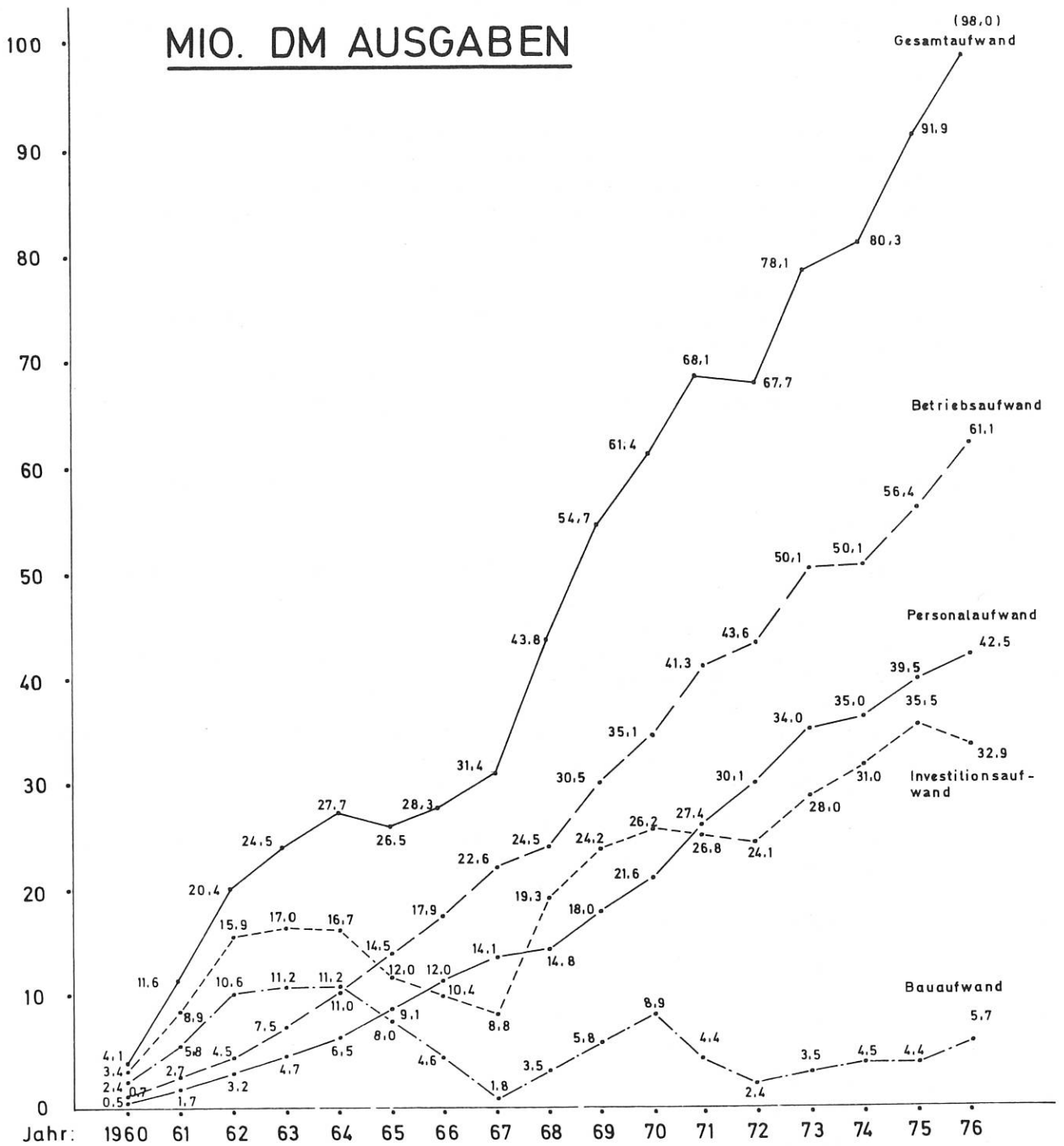


Abb. 5

c) Einkaufsabteilung

(Richard STEMPEL)

Anzahl und Umfang der 1972 getätigten Bestellungen (rund 11.500) als auch die Lagerentnahmen haben gegenüber dem Vorjahr weiter zugenommen. Dies ist, u.a. auf die angelaufenen Vorarbeiten für die Experimente W VII und WEGA sowie auf besondere Aktivitäten z. B. in den Bereichen Laserentwicklung und Mikrowellentechnik zurückzuführen. An größeren Aufträgen wären zu erwähnen die Bestellung der Magnetfeldspulen W VII, der Stromleitungen für 40 kA zum und vom 1,4 GJ Stoßstromgenerator, einer Kondensatorbatterie für den Jodlaser, des Hochspannungsgenerators und des Gleichstromgenerators für die Neutralteilcheninjektion, einer Elektronenquelle, eines UV-Monochromators, mehrerer Vakuumanlagen und eines Marx-Generators.

Die Mitte letzten Jahres festzustellende Preissteigerungen für Verbrauchs- und Investitionsgüter konnten in vielen Fällen durch Aushandeln günstigerer Konditionen und Rabatte wieder ausgeglichen werden.

Beim Einkauf ausländischer Geräte und Bauteile haben sich die verstärkten Bemühungen um einen Direktbezug vom Hersteller oder über einen Kommissionär sehr bewährt. Nachdem auch sämtliche Einfuhr- und Zollformalitäten von der Einkaufsabteilung selbst abgewickelt werden, haben sich erfreulicherweise erhebliche Einsparungen ergeben.

Der Gerätepool vereinnahmte 1972 aus dem Institutsbereich rund 600 Geräte, Instrumente, Vorrichtungen usw., während ca. 1.200 Geräte wieder in die Abteilungen zurückflossen. Von den im IPP nicht mehr verwendbaren, technisch aber noch brauchbaren Geräten konnte eine größere Anzahl an andere Einrichtungen verkauft oder verliehen werden. Vom Gerätepool wurde ferner die laufende technische Überarbeitung der umfangreichen Listen des Elektrolagers übernommen, durch die den Technikern die Auswahl geeigneter Bauteile erleichtert werden soll.

d) Sozialabteilung

(Berthold Appel)

1. Wohnungsfürsorge

Die restlichen 12 von 40 Wohnungen des Bauvorhabens Garching-Ost wurden Ende Januar 1972 bezogen.

Mit den Wohnbaumitteln des Haushaltsjahres 1972 werden in Garching seit Oktober dieses Jahres 22 Dreizimmerwohnungen in Terrassenbauweise (E + 3) errichtet, deren Wohnfläche sich mit durchschnittlich 83,4 qm im Rahmen des steuerbegünstigten Wohnungsbaues hält. Für dieses Vorhaben stellt das IPP ein Arbeitgeberdarlehen von 1,6 Mio DM, pro Wohnung also 72,7 TDM, zur Verfügung. Die Oberfinanzdirektion München hat die Baupläne, die technische Durchführung sowie die bei 1,48 TDM pro qm Wohnfläche liegenden Baukosten geprüft und als besonders günstig bezeichnet. Im Einvernehmen mit der OFD wurde die Miete auf 4,44 DM/qm festgelegt; die Wohnungen sollen im Herbst 1973 bezugsfertig sein.

Unter Berücksichtigung der noch im Bau befindlichen Wohnungen ergibt sich zum Ende des Berichtszeitraumes folgendes Bild:

1. Institutseigene Wohnungen

a) auf dem Institutsgelände (Dienstwohnungen)	8	
dto. (Gästewohnungen)	6	
b) Garching, Lehrer-Stieglitz-Str. (Dienstwohnungen)	<u>36</u>	50

2. Bezuschufte Wohnungen

Ungererstraße	16	
Lasallestraße	26	
Otto-Hahn-/Max-Planck-Straße (davon 3 Gästewohnungen)	108	
Türkenstraße	12	
Breslauer Straße (Garching-Ost)	40	
Rathausstraße Garching	<u>22</u>	224

Übertrag:

274

3. Angemietete Wohnungen

Rümannstraße 59 (Gästewohnung)	1	
Elisabethstraße 71 (Gästewohnung)	1	
Vaterstetten (Gästewohnung)	1	
Heßstraße (Gästewohnung)	1	
Dienstwohnungen	<u>3</u>	<u>7</u>
		281

Im Berichtsjahr wurden 11 Familienheime und 5 Eigentumswohnungen gefördert, so daß insgesamt 68 Familienheimdarlehen bewilligt worden sind.

Im Augenblick liegen 67 Wohnungsbewerbungen und 47 Anträge auf Familienheimdarlehen vor. Für das Geschäftsjahr 1973 ist der Bau von 14 Wohnungen in Garching-Ost vorgesehen.

2. Kantinenbereich

Im September 1971 wurde das Werner-Heisenberg-Gymnasium eröffnet. Da das Gymnasium seit Februar 1972 als Ganztagschule betrieben wird, hat das Institut der Bitte entsprochen, gegen Kostenbeteiligung die Versorgung der Schüler mit einer Mittagsmahlzeit zu übernehmen.

3. Fahrbereitschaft

Mit dem Einsatz des Münchener Verkehrsverbundes am Juni 1972 wurde eine Überprüfung des Omnibus-Zubringerdienstes erforderlich. Die Geldgeber hatten für diesen Fall die Einstellung der Stadtlinien und eine Beschränkung auf den dann zu verstärkenden Pendelverkehr zur U-Bahn-Station Freimann gefordert.

Um Härtefälle zu vermeiden, beschloß das Kuratorium auf Antrag der Geschäftsführung, die innerstädtischen Buslinien beizubehalten, wenn die betroffenen Mitarbeiter zur Übernahme der vollen Kosten bereit wären. Eine Umfrage erbrachte die Zustimmung von 144 Mitarbeitern. Durch Zusammenlegung der Linien 8 (Elisenbunker) und 10 (Technische Universität) sowie der Linien 7 (Ostbahnhof) und 12 (Grünwalderstraße) konnte der Fahrpreis zunächst auf monatlich DM 12,- festgesetzt werden.

4. Reinigung

Am 30. 6. 1972 wurde eine Reinigungsfirma unter Vertrag genommen. Dadurch war es möglich, eine Reihe von freigewordenen Stellen im Reinigungsdienst nicht wieder zu besetzen. Bei Bewährung soll die Zusammenarbeit mit dem Reinigungsunternehmen verstärkt werden.

e) Bauabteilung

(Bauingenieur Martin MAHL)

Neubauten:1. Maschinenhaus EZ 2

Mit der Planung für ein Gebäude zur Unterbringung des 1,5 GJ-Umformers wurde im Januar 1972 begonnen. Sie umfaßt:

Maschinenhaus mit einer Grundfläche von ca. 49,00/11,00 m und einer Gebäudehöhe von 15,00 m. In diesem Maschinenhaus wird der Generator, das Schwungrad (240 t) und der Antriebsmotor auf einem auf Federn gelagerten Fundament mit einer Länge von ca. 25,00 m und einer Gesamthöhe von ca. 6,00 m aufgestellt. Zur Montage der Maschinenteile werden im Maschinenhaus 2 Brückenkräne mit einer Nutzlast von je 120 t montiert.

Schalthaus mit einer Grundfläche von ca. 350 qm. Im Keller-, Erd- und Obergeschoß werden alle Geräte und Maschinen zum Betrieb des Generators sowie die Hochspannungszellen für die Erweiterung der 10 kV-Einspeisung untergebracht.

Mit den Bauarbeiten wurde im August begonnen. Die Rohbauarbeiten einschließlich Dacheindeckung wurden im Berichtsjahr soweit abgeschlossen, daß 1973 mit dem Bau des Maschinentisches und den Ausbauarbeiten begonnen werden kann. Das Gebäude soll im August 1973 fertiggestellt sein.

Mit zur Planung – soweit sie den baulichen Teil betreffen – gehören die Kabeltrasse IPP/Isar-Amperwerke und die Stromschienenkanäle vom Maschinenhaus zu den Experimenten. Von den Kabelzugrohren zwischen dem Maschinenhaus und dem Umspannwerk der Isar-Amperwerke wurden etwa 400 m verlegt und die dazugehörigen Kabelschächte betoniert. Während der Bachauskehr im Oktober wurden die Rohre im Bachbett des Mühlbaches und des Gießenbaches eingebaut.

2. Gästespeiseraum

An der Südseite des Kantinengebäudes wurde im September mit dem Bau eines Gästespeiseraumes begonnen, der voraussichtlich im Frühjahr 1973 fertiggestellt sein wird. Der Anbau ist erforderlich, um in der Kantine Platz für eine Erweiterung der Cafeteria zu erhalten.

3. Laborhalle L 6

Für Abteilung Relativistische Plasmen wurde eine Schallschutzkabine mit einer Grundfläche von 12,0/9,0/3,0 m aufgestellt.

Für die Abteilungen E 1 und E 3 wurden die Bühnen in Stahl bzw. Aluminium erweitert und darauf Laborkabinen aufgestellt.

Umbauten:

Neben einer Reihe von Umbauarbeiten an Gebäuden, die durch Umgruppierungen in den Abteilungen bzw. durch Aufstellen neuer Experimente bedingt waren, wurden die Arbeiten für die Wiederinstandsetzung der durch Brand beschädigten Laborhalle I 1 abgeschlossen.

Die Telefonzentrale wurde auf 1.000 Nebenstellen ausgebaut.

Gebäude in Planung

1. Erweiterung der Zentralwerkstatt

Die Arbeiten an diesem Gebäude wurden bis zu einer endgültigen Entscheidung der Geldgeber über die Erweiterung unterbrochen.

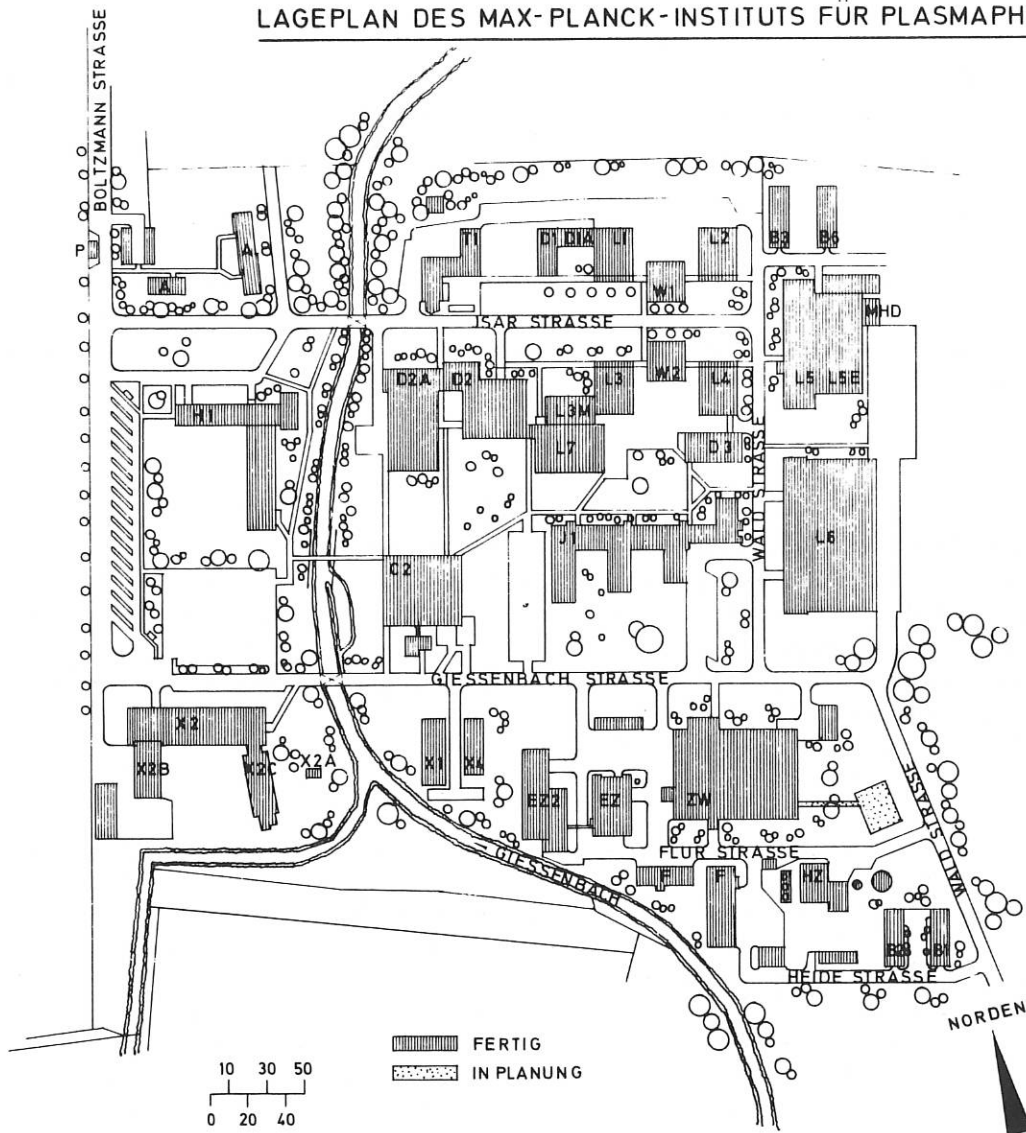
2. Maschinenhaus L 7

Für ein Gebäude zur Unterbringung von Hilfsmaschinen für das Experiment W VII wurden Voruntersuchungen durchgeführt.

3. Kühlwasserversorgung

Der Bedarf an Kühlwasser aus dem Grundwasser nimmt im Institut ständig zu. Um die künftige Versorgung sicherzustellen, wurden im Hinblick auf die Projektierung einer Grundwassererschließung zunächst Bodenuntersuchungen und Pumpversuche an bestehenden Brunnen durchgeführt. Die Ergebnisse lassen erwarten, daß Grundwasser in ausreichender Menge auf dem Gelände gewonnen werden kann.

LAGEPLAN DES MAX-PLANCK-INSTITUTS FÜR PLASMAPHYSIK



P	Pforte
A	Dienstwohnungen - Gästewohnungen
T1 - D1 - D1A - L1 - W1 - L2	Experimentelle Plasmaphysik 1
L3 - L3M - L7 - W2 (Teil) - D3	Experimentelle Plasmaphysik 2
L6 (Teil)	Experimentelle Plasmaphysik 3
L5 - L5E - MHD	Experimentelle Plasmaphysik 4
L6 (Teil)	Relativistische Plasmen
D2 - D2A (Teil)	Abteilung Theorie
D2A (Teil)	Abteilung Informatik
L4 - W2 (Teil) - B3	Abteilung Oberflächenphysik
I1 - L6 (Teil)	Abteilung Technik
ZW	Zentralwerkstatt - Zentrallager
EZ - EZ 2	Energiezentralen
H1	Geschäftsführung
B1 - B2	Verwaltung und Allgemeine Dienste
B6	Hausverwaltung
C2	Gerätepool
X1 - X4	Kantine
	Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik (Institut für Extraterrestrische Physik)

Abb.6

4. Erweiterung des Gebäudes für Rechenmaschine

Für das zur Erweiterung der Rechenmaschine IBM 360/91 erforderliche Gebäude wurde ein Vorentwurf gefertigt.

Hausverwaltung

Ein großer Teil der Instandsetzungs- und Umbauarbeiten wurde mit den Fach- und Hilfskräften der Hausverwaltung ausgeführt. Der Stamm von Fachkräften in der Hausverwaltung ermöglicht es dem Institut, derartige Arbeiten mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand auszuführen. Fremdfirmen sind schwer bzw. nur unter unverhältnismäßig hohen Kosten für Transport und Wegegeld zu bewegen, kleine Aufträge in Garching auszuführen.

7.) Sicherheit

(Dipl.Phys. Dr.-Ing. Manfred HÜLS)

Die der Geschäftsführung nach der Reichsversicherungs-Ordnung, der Gewerbeordnung, dem Atomgesetz, den gesetzlichen Vorschriften der Unfallversicherungsträger und anderen Bestimmungen obliegenden, Arbeitssicherheit, Strahlen- und Objektschutz betreffenden Fürsorgepflichten und Aufgaben werden im IPP vom Hauptsicherheitsbeauftragten wahrgenommen. Damit liegt der Schwerpunkt seiner Tätigkeit in der Sicherheitsorganisation, der Koordination und Überwachung einer allgemeinen und anlagespezifischen Gefahrenabwehrplanung sowie aller Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen und zur Eingrenzung ihrer Folgen. Wichtige Unterstützung erfährt er hierbei durch die nach § 719 RVO bestellten Abteilungs-Sicherheitsbeauftragten, die aus ihrer fachlichen Qualifikation, Betriebserfahrung und Ortskenntnis wesentliche Beiträge zur Unfallbekämpfung in den verschiedenen Bereichen leisten.

Dem Sicherheitsausschuß des IPP gehören neben dem Hauptsicherheitsbeauftragten als Vorsitzenden und Vertreter der Geschäftsführung zur Zeit 14 Sicherheitsbeauftragte aus den verschiedenen Abteilungen und zwei Vertreter des Betriebsrats an. Im Jahr 1972 befaßte sich dieser Ausschuß in neun Sitzungen mit Problemen der Arbeitssicherheit und des Unfallschutzes, mit Maßnahmen der vorsorglichen und aktiven Brandverhütung und des Umweltschutzes sowie mit organisatorischen Notwendigkeiten, wie sie sich beispielsweise aus der im September vom Bundesinnenministerium empfohlenen Verstärkung der allgemeinen Sicherheitsvorkehrungen oder aus der neuen Aufzugsverordnung ergaben. Der Ausschuß bearbeitete auch Vorschläge und Empfehlungen zum Objektschutz und Pfortenkontrollsystem, zu Verkehrs- und Parkplatzfragen wie zu solchen der Arbeitsplatzgestaltung (Lüftung, Schallpegel, Beleuchtung) und behandelte infolge des Mangels gesetzlicher Vorschriften auch Fragen des Strahlenschutzes an plasmaphysikalischen Apparaturen und fusionsrelevanten Experimenten.

Der Hauptsicherheitsbeauftragte ist seit dem 8. August 1972 dem Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen bis zum Inkrafttreten einer für das Jahr 1973 erwarteten, als Gesetzesnorm der Ersten Strahlenschutz-Verordnung vergleichbaren Röntgen- und Beschleunigerverordnung vorerst als alleiniger Strahlenschutzverantwortlicher des IPP benannt. Da verschiedene Experimente unter Freisetzung teils erheblicher Dosen an Röntgen-Bremsstrahlung verlaufen, wurden im Berichtsjahr verschiedene Mitarbeiter in Zusammenarbeit mit der GSF-Neuherberg durch Filmplaketen auf die empfangene Röntgendosis überwacht. In 391 Auswertungen ergaben sich dabei glücklicherweise keine personenschädigenden Dosisüberschreitungen. Zur weiteren Strahlenschutzüberwachung wurden Stabdosimeter, Strahlenwarngeräte, Monitore und Dosisleistungsmesser angeschafft, die bei Bedarf an die Abteilungen ausgegeben werden.

Im Rahmen von zahlreichen Betriebsbegehungen und Beratungen wurden auch mit Vertretern der Berufsgenossenschaft und der Gewerbeaufsicht Arbeitsplätze in den Abteilungen besichtigt und die Einhaltung der Unfallverhütungsvorschriften wie der ordnungsgemäßen Benutzung der Arbeitsschutz-Einrichtungen und -Mittel überprüft. Grobe Verstöße gegen die Unfallverhütungsvorschriften konnten nicht festgestellt werden; geringfügige Mängel wurden in der Regel an Ort und Stelle beseitigt.

MELDEPFLICHTIGE UNFÄLLE 1972							
Monat	Betriebs- unfälle	Wege- unfälle	Gesamt- unfallzahl	Gesamt- belegschaft	Arbeits- ausfalltage	Arbeitsausfall- tage je Unfall	Arbeitsausfalltage je Unfall und Mit- arbeiter
Januar	2	1	3	1089	100	33,3	0,0306
Februar	3	-	3	1109	49	16,3	0,0147
März	2	-	2	1108	13	6,5	0,0059
April	2	1	3	1092	22	7,3	0,0067
Mai	1	-	1	1098	18	18,0	0,0164
Juni	4	-	4	1095	20	5,0	0,0046
Juli	2	-	2	1106	32	16,0	0,0145
August	1	2	3	1107	35	11,7	0,0105
September	1	-	1	1098	23	23,0	0,0209
Oktober	5	-	5	1090	20	4,0	0,0037
November	4	-	4	1077	45	11,3	0,0104
Dezember	1	-	1	1073	6	6,0	0,0056
Summe	28	4	32		383		
Mittelwert	2,3	0,3	2,6	1095	31,9	13,2	0,0120

Abb.7

Die Zahl der meldepflichtigen Unfälle veränderte sich bei 1073 Mitarbeitern am Jahresende 1972 von 33 im Vorjahr mit 1086 Beschäftigten nur unbedeutend auf 32. Die prozentuale Unfallquote erniedrigte sich im Berichtsjahr entsprechend von 3,04 % (1971) auf 2,98 %. Der unfallbedingte Arbeitszeitverlust (Arbeitsausfalltage je Unfall) nahm mit genau 12 Tagen gegenüber 1972 um 3,2 % ab. Tödliche Unfälle und Fälle anzeigepflichtiger Berufskrankheiten waren 1972 nicht zu verzeichnen. Die Zahl der Wegeunfälle erniedrigte sich im Vergleich zum Vorjahr von 8 auf 4.

Im Vergleich zur Zahl meldepflichtiger, den gewerblichen Berufsgenossenschaften angezeigter Arbeits- und Wegeunfälle, die im vergangenen Jahr 105,8/1000 Versicherter betrug, liegt das IPP 1972 mit 29,8/1000 so günstig, daß

gemäß § 725 (2) RVO wiederum mit der Gewährung eines Nachlasses auf den Mitgliedsbeitrag zur Berufsgenossenschaft von ca. 20 % gerechnet werden kann (Vergleichszahlen 1969 und 1970: je 21 %; 1971: 22 %).

Einen Überblick über das Unfallgeschehen in der Zeit vom 1.1.1968 bis 31.12.1972 gibt die nachstehende Tabelle :

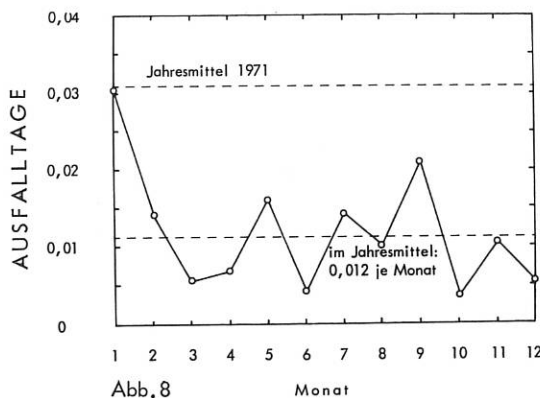


Abb.8

Arbeitsausfalltage je Belegschaftsmitglied aufgrund der Unfälle des jeweiligen Monats im Jahr 1972

Die für Notfälle und zur vorsorglichen Schadensverhütung aufgestellte Organisation, insbesondere die freiwillige Betriebsfeuerwehr mit derzeit 14 Mitgliedern konnte weiter ausgebaut werden. Im Berichtsjahr wurden 23 halbtägige Feuerwehübungen durchgeführt. Acht Feuerwehrleute nahmen an einem Ersatztraining unter Verwendung schwerer Atemschutzgeräte an der Übungstrecke der Hauptstelle für Grubenrettungswesen in Hohenpeißenberg teil. Außerdem wurden Brandschutzseminare und Ausstellungen besucht. Mehrere Mitglieder unserer Betriebsfeuerwehr absolvierten in der Staatlichen Feuerweherschule Regensburg den Maschinisten-Kurs bzw. bestanden erfolgreich die Abschlußprüfungen zum sogenannten Grund- und Mittelstufen-Lehrgang.

Obschon die Hauptaufgabe einer Feuerweh in der Brandursachenvermeidung und der vorsorglichen Feuerverhütung liegt, mußte unsere Betriebsfeuerweh 1972 in 4 Einsätzen ihre Schnelligkeit und Einsatzbereitschaft bei

Jahr	Belegschaftszahl zum Jahresende	Zahl der Unfälle	Unfallquote
1968	969	32	3,30 %
1969	970	25	2,58 %
1970	1023	28	2,74 %
1971	1086	33	3,04 %
1972	1073	32	2,98 %

Abb.9 Entwicklung der Unfallquoten zwischen 1968 und 1972

der aktiven Brandbekämpfung zeigen. Sie leistete dabei erfolgreich Hilfe und verhütete weitere Schäden.

Eine wichtige Hilfe bei der Erkennung von Brandgefahren stellt auch ein ausführliches Gutachten des Feuerschadensverhütungsdienstes der Allianz-Versicherungs-AG dar, das Ende 1972 vorlag. Ein anderes Gutachten, welches organisatorische Empfehlungen zum Feuerschutz unserer Anlage geben soll, wird vom Landesamt für Brand- und Katastrophenschutz erwartet. Dieses Gutachten soll als Grundlage zu Verhandlungen über einen gemeinsamen Brandschutz aller Garchingener Forschungseinrichtungen dienen. In diesbezüglichen Vorverhandlungen mit dem Landratsamt und den uns benachbarten Instituten hat sich ergeben, daß die Einrichtung einer gemeinsamen hauptberuflichen Werksfeuerwehr sowohl von den Behörden aus finanziellen Gründen gewünscht wie von den Beteiligten als nützlich und zweckmäßig befürwortet wird.

8.) Öffentlichkeitsarbeit

(kommissarisch : Dipl. Phys. Dr.-Ing. Manfred HÜLS)

Für ein Forschungszentrum ergibt sich eine doppelte Motivation für die Öffentlichkeitsarbeit :

1. die Information zur Rechtfertigung der finanziellen Aufwendungen für die Forschung gegenüber der Öffentlichkeit,
2. die Aufklärung über wissenschaftliche Entwicklungen zum Abbau und zur Reduzierung der zunehmenden, den Fortschrittsglauben früherer Jahre verdrängenden Skepsis gegenüber Wissenschaft und Technik.

Die Aufgabe der Öffentlichkeitsarbeit besteht damit darin, daß Informationen über die Planung und Durchführung von Forschungsarbeiten nach außen vermittelt werden. Dies geschieht durch die Erstellung und Verbreitung von Informationsschriften und Berichten, die Veranstaltung von Presse- und Informationstagungen, die Beschickung von Ausstellungen, die Organisation von Institutsbesichtigungen und Betreuung der Gäste.

Im Jahr 1972 wurde wiederum eine große Zahl in- und ausländischer Besucher empfangen, die meisten davon in Gruppen, die von der Öffentlichkeitsarbeit betreut wurden und in ausführlichen Programmen, Filmvorführungen, Rundgängen und Besichtigungen einen Eindruck vom IPP erhielten. Daß diese Führungen erfolgreich sind, zeigt am besten die Tatsache, daß z. B. zahlreiche Gymnasien, Hochschulinstitute und Betriebe immer wieder ihre Gruppen zum Besuch anmelden und schon jetzt viele Termine für das Jahr 1973 vergeben sind.

Der "Tag der Offenen Tür 1972" war wegen der Olympischen Spiele auf den 6. September gelegt worden, um auch Besuchern und Teilnehmern der Spiele die Möglichkeit zu bieten, das IPP kennen zu lernen. Wegen der tragischen Ereignisse am 5. September im Olympischen Dorf und der Trauerfeier im Olympiastadion wurde jedoch der angekündigte Besuch unseres Instituts durch Olympiateilnehmer sowie anderer wegen der Spiele in München weilender Gäste (z. B. die des Olympischen Jugendlagers) abgesagt. Trotzdem überraschte der mit über 900 Besuchern unerwartet starke Zustrom von Interessenten, die die Gelegenheit nützten, in einem "wahren Superprogramm" (Münchner Merkur) "den Forschern über die Schulter zu schauen" (Stadtanzeiger).

Von der großen Zahl namhafter Gäste aus Wissenschaft und Politik, die 1972 das IPP besuchten, sollen besonders genannt sein:

- Dr. Klaus von Dohnanyi
Bundesminister für Bildung und Wissenschaft
- Dr. Hyong-Sob-Choi
Minister für Wissenschaft und Technologie, Korea
- Professor C. J. Pereira de Lucena
Brasilianischer Koordinator für Mathematik und Datenverarbeitung

- Professor Dr. E. Teller
Associate Director - At - Large, University of California, USA
- Dr. Sh. Umamo
Toyo - Engineering Corporation, Japan
- Professor Dr. J. Morosow
stellvertretender Vorsitzender des Staatskomitees für die Nutzung der Atomenergie der UdSSR
- Professor Dr. A. Rukhadze
Lebedev - Institut, Moskau
- Ch. Herzig
Leiter der Atomic Energy Division des Department of Trade and Industry, Großbritannien
- Professor Dr. Beresin
Korr. Mitglied des AdW und Dekan der Fakultät "Chemie" der Universität Moskau

Im Februar 1972 besuchte eine Delegation jugoslawischer Professoren der Universität Zagreb das IPP, im April eine Gruppe von Physikern der Universität Uppsala. Acht Präsidenten und Vize-Präsidenten großer amerikanischer Energieversorgungsunternehmen wurden im Juni ebenso als Gäste empfangen wie sowjetische wissenschaftliche Abordnungen im Juli und September, eine sowjetische Regierungsdelegation im Dezember oder eine Gruppe hoher britischer Beamter aus dem Nuklearbereich im November. Weiterhin konnten viele in- und ausländische Wissenschaftler verschiedener Disziplinen und Journalisten von Rundfunk, Presse und Fernsehen begrüßt werden.

Herr W. Büdeler drehte für das ZDF über Fusionsforschung in der Reihe "Aus Forschung und Technik", und Herr G. Hörmann vom Institut für Filmgestaltung Ulm machte einen Film mit dem Arbeitstitel "Großforschung, zum Beispiel Garching".

Im Juli fand im IPP die Hoch-Beta-Tagung mit 120 und im September ein Symposium über Ion-Surface-Interaction mit 170 in- und ausländischen Teilnehmern statt.

Am 7. November 1972 wurde zum zweitenmal eine Informationstagung organisiert, an der über 40 Journalisten der Tages- und Fachpresse teilnahmen. Nach der Resonanz, die diese Veranstaltung in der Öffentlichkeit gefunden hat, wird das IPP auch zukünftig diese Art der Vorstellung und Selbstdarstellung pflegen, um so einem breiteren Publikum Aufgaben, Arbeiten und Probleme der Plasmaphysik und Fusionsforschung näherzubringen.

Die langjährige Leitung der Öffentlichkeitsarbeit, Frau Dr. Schüler, schied mit Wirkung vom 1. Juni 1972 aus dem IPP aus; seit dieser Zeit wird das Referat kommissarisch verwaltet.

9.) Betriebsärztlicher Dienst

(Dr. Nils KAISER)

Schon im Jahre 1964 wurden im Institut für Plasmaphysik zwei Erste-Hilfe-Stationen, eine im Ingenieurgebäude und eine zweite in der Zentralwerkstatt, eingerichtet. Jede dieser beiden Stationen wurde mit einer voll ausgebildeten Krankenschwester besetzt. Die Einrichtung dieser Stationen hatte sich als notwendig erwiesen, da das Institut in relativ großer Entfernung der umgebenden Ortschaften errichtet wurde und vor allem bei Unfällen die Herbeiholung von Ärzten der Umgebung oft längere Zeit benötigte. So hatte es sich bei einigen Unfällen gezeigt, daß die Herbeiholung eines Sanitätskraftwagens oder eines Arztes unvermeidbar lange Zeit in Anspruch nahm.

Als im Jahre 1965 ein Arzt als wissenschaftlicher Mitarbeiter an das Institut kam, wurde von ihm die Betreuung dieser beiden Stationen übernommen, um den Institutsangehörigen eine verbesserte ärztliche Versorgung zu ermöglichen, dem Institut Arbeitszeitverluste zu ersparen und die Erstversorgung von Unfällen, auch für die Nachbarinstitute, zu verbessern. Dafür wurden vom Institut neben einem Sanitätskraftwagen, einem Notbeatmungsgerät und einem Herzschrittmacher die dringend benötigten Geräte angeschafft, um bei Unfällen wirksame Erste-Hilfe leisten und Schwerverletzte rasch und sicher in eines der umliegenden Krankenhäuser transportieren zu können.

Mit dem Fortschreiten des Institutsaufbaues und der Vergrößerung der Nachbarinstitute wuchsen die Anforderungen, die an diese Stationen gestellt wurden. Hierdurch wurden die zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten zu klein. Beim Neubau des Verwaltungsgebäudes wurden daher auch Räume für den Betriebsärztlichen Dienst eingeplant, da die Zahl der Institutsangehörigen und der Mitarbeiter der Nachbarinstitute inzwischen eine Größe erreicht hatte, die nach den geltenden Empfehlungen die Einrichtung eines derartigen Dienstes notwendig erscheinen ließ, um eine ausreichende ärztliche Versorgung zu gewährleisten.

Der Aufbau des Betriebsärztlichen Dienstes wurde in Anlehnung an die bei anderen Großforschungseinrichtungen übliche Form und Größe durchgeführt. Im Herbst 1970 konnten die neuen Räume bezogen werden. In ihr stehen alle für eine wirksame Erste-Hilfe, die originäre Aufgabe des Betriebsärztlichen Dienstes ist, notwendigen Geräte und Einrichtungen zur Verfügung. Außerdem wurde ein medizinisch-diagnostisches Labor eingebaut, in dem sämtliche Untersuchungen durchgeführt werden, die für die laufende Überwachung des Gesundheitszustandes der Institutsangehörigen notwendig sind, die bei ihrer Arbeit erhöhten gesundheitlichen Gefahren ausgesetzt sind.

Für die physikalische Diagnostik stehen Hör- und Sehtestgeräte, die notwendige Apparatur zur Augen-, Ohren-, Nasen- und Kehlkopfspiegelung zur Verfügung sowie ein Gerät zur Durchführung von Augenhintergrundaufnahmen, das unter anderem für die mit Laserstrahlen arbeitenden Institutsangehörigen benötigt wird.

Für physikalisch-therapeutische Zwecke wurden ein Kurzwellengerät, ein Gleichstromtherapiegerät, ein Inhalationsgerät und ein Rot- und Blaulichtbestrahlungsgerät angeschafft.

Im Jahre 1972 hat der Betriebsärztliche Dienst insgesamt 7006 Behandlungen, Beratungen bzw. Untersuchungen ausgeführt.

10.) Patente

(Dr. jur. Manfred BAUER, Dr.-Ing. Manfred HÜLS)

Der Patentstelle obliegt die Verwaltung und Verwertung der Patente. Der in diesem Rahmen anfallende umfangreiche Schriftverkehr mit dem EURATOM-Patentbüro in Luxemburg, der Max-Planck-Gesellschaft, den Erfindern, der Verwertungsgesellschaft Garching Instrumente GmbH und dem Patentanwalt ist größtenteils formularmäßig erfaßt. Die nachfolgende Zusammenstellung gibt eine Übersicht über die zu betreuenden Patentanmeldungen:

<u>Laufende deutsche Anmeldungen</u>	<u>63</u>
davon erteilte Patente	10
eingetragene Gebrauchsmuster	13
eingetragene Geschmacksmuster	1
Erteilte ausländische Patente	18
<u>Neuanmeldungen in 1972:</u>	
deutsche Patentanmeldungen	10
deutsche Gebrauchsmusteranmeldungen	1
ausländische Patentanmeldungen	36
erteilte deutsche Patente in 1972	5
eingetragene Gebrauchsmuster in 1972	1
Freigaben an den Erfinder	6

Daneben obliegt der Patentstelle die Berechnung der Erfindervergütungen. Zur Feststellung des Anteilsfaktors und zu den verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten des Erfindungswertes wurden entsprechende Formulare entwickelt. Die Zahlung von Vergütung für Erfindungen, die nicht nach außen wirtschaftlich verwertet, sondern nur im Institut und nur zu Forschungszwecken eingesetzt werden, wirft Fragen grundsätzlicher Art auf. Diese und andere aktuelle Fragen aus dem Bereich Patentverwaltung und -verwertung werden laufend mit Fachleuten aus dem BMBW, der Industrie, von Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen diskutiert, unter anderem im Unterausschuß für Patentfragen der AGF und im Rahmen des Deutschen Atomforums.

Sofern kein wirtschaftlich günstigerer Weg gefunden werden kann, erfolgt die wirtschaftliche Verwertung der Erfindungen über die Verwertungsgesellschaft Garching Instrumente.

11.) Rechts- und Vertragsangelegenheiten

(Dr. jur. Manfred BAUER)

Neben der Wahrnehmung institutsrechtlicher Angelegenheiten wie Fertigung von Vorlagen und Beschlußentwürfen für die Sitzungen des Kuratoriums, Vorbereitung der Geschäfts- und Jahresberichte sowie Klärung rechtlicher Fragen aus Satzung, Geschäfts- und Betriebsordnung, lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf dem Gebiete des Vertragswesens, bei der Ausarbeitung neuer Formularverträge und insbesondere bei der Mitwirkung an allen Verträgen, die nicht formularmäßig abgeschlossen werden.

Mit der Vergrößerung der Experimente und der Aufnahme neuer Aktivitäten nehmen die vertraglichen Beziehungen des Instituts sowohl in ihrem zahlenmäßigen Umfang als auch in ihrer finanziellen Bedeutung zu. So waren z. B. im Berichtszeitraum allein für das im Aufbau befindliche Experiment W VII Verträge zum Bau von Magnetfeldspulen (Volumen ca. 3,4 Mio DM), von Stromleitungen zum Stoßstromgenerator und zum Experiment (Volumen ca. 1,5 Mio DM), zum Kauf einer Hochspannungsanlage, eines Umformersatzes, eines UV-Monochromators usw. zu erarbeiten, Forschungs- und Entwicklungsverträge auszuarbeiten, Garantie- und Lieferbestimmungen dieser zusammenhängenden Bestellungen zu koordinieren. Diese und andere Verträge müssen anschließend auf ordnungsgemäße Durchführung überwacht, fremde Ansprüche (z. B. Mehrkostenforderungen) geprüft, eigene Ansprüche (z. B. Gewährleistungsansprüche, Schadensersatzforderungen) verfolgt werden.

Schließlich wurden die rechtlichen Angelegenheiten der Assoziation mit EURATOM bearbeitet, Sitzungen und Beschlüsse des Lenkungsausschusses und des Unterausschusses für Verwaltungsangelegenheiten vorbereitet und protokolliert.

12.) Organisation/Revision

(Hans-Joachim PASCHKE, Hansgeorg WEIGEL)

Die "Organisation" übt eine informierende und beratende Tätigkeit in allen Organisationsfragen des Instituts aus und befaßt sich z. Zt. fast ausschließlich mit der EDV-Organisation.

So wurde eine Organisationsanweisung für den Änderungsdienst der Basisdaten der Verwaltung herausgegeben und zu verschiedenen Gebieten der EDV- und allgemeinen Organisation u. a. folgende Organisations- und Rationalisierungsvorschläge ausgearbeitet und zur Diskussion gestellt:

- Zur Auslegung der Grundsätze ordnungsgemäßer Buchführung beim Einsatz von Datenverarbeitungsanlagen
- Vorschläge zu einer Gesamtkonzeption, die alle EDV-Teilgebiete der Verwaltung einbezieht
- Überblick über den Stand der Datenverarbeitung im Verwaltungsbereich
- Verschlüsselungsprobleme im Materialbereich
- Materialabrechnung, Grundlagen, Sachfragen, Programme
- Fahrbereitschaft

Gleichzeitig begann die Vorbereitung für eine EDV-Organisation der Materialwirtschaft und der Haushaltüberwachung, die unter Federführung der Organisation im Jahre 1973 durchgeführt werden soll.

Die "Revision" war im ersten Halbjahr 1972 nicht besetzt, da ein geeigneter Nachfolger für den bisherigen Stelleninhaber nicht gefunden werden konnte. Erst im zweiten Halbjahr 1972 konnte die Arbeit der Innenrevision wieder fortgesetzt werden. Hier lag der Schwerpunkt der Aufgaben wieder in der Bearbeitung der Prüfungsberichte von Bundesrechnungshof und Innenrevision der Max-Planck-Gesellschaft. Im Rahmen des Prüfungsplanes wurden ferner Kassenprüfungen sowie Feststellungen über das Telefonwesen, das Lagerwesen usw. durchgeführt.

Veröffentlichungen und Vorträge

- 1 Ahlborn, B., P. Gensel, K.L. Kompa "Transverse flow, transverse pulsed, chemical CO laser", J. Appl. Phys. 43, 2487 (1972)
 - 2 Allgeyer, R., G. Bäumler, J. Gernhardt, G. Herppich, W. Jakobus, F. Kerl, O. Klüber, A. Knobloch, H. Lohnert, Ch. Ludescher, R. Pöhlchen, H. Roos "The Design and Installation of the Garching Tokamak Facility Pulsator I", Proc. 7th Symp. on Fusion Reactor Technology, Grenoble, October 1972
 - 3 Andelfinger, C., E. Buchelt, W. Dommaschk, J. Fink, R. Griek, W. Herrmann, I. Hofmann, D. Jacobi, P. Merkel, W. Ott, H.B. Schilling, A. Schlüter, U. Schumacher, G. Siller, M. Ulrich "Status Report of the Garching ERA Experiment", Symp. on Collective Methods of Acceleration, Dubna, USSR, 1972
 - 4 Andelfinger, C., W. Dommaschk, W. Ott "Bright high current 2 MeV electron beam tube working in a poor vacuum" Proc. Vth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Posen, Polen (1972), p 383
 - 5 Andelfinger, C. "Elektronenringbeschleuniger", Physik in unserer Zeit 3, 74 (1972)
 - 6 Bateman, R.G., M.D. Kruskal⁺ "Linear Time-Dependent Vlasov Equation", Case-Van Kampen Modes Phys. of Fluids 15, 277 (1972)
 - 7 Bateman, R.G. "Long Wavelength Ion Acoustic Waves", Physical Rev. Letters 29, 1499 (1972)
 - 8 Bateman, R.G. "Specific Magnetic Inductance in Toroidal Systems", Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, B 4 (1972)
- Bäumler, G. s. Allgeyer
- 9 Becker, G., O. Gruber, H. Herold "Dynamic Stabilization Experiments with Standing Wave Magnetic Fields", Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, G 2 (1972)
 - 10 Becker, G., O. Gruber, H. Herold "Dynamic Stabilization Experiments on a Screw Pinch with Standing Wave Magnetic Fields", Proc. V. Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Vol. 1., 53 (1972)
 - 11 Becker, G., "Mode Coupling in Dynamic Stabilization of MHD Modes", Proc. V. Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, October 1972
 - 12 Behrisch, R. "First Wall Erosion in Fusion Reactors", Nucl. Fusion, 12, 695 (1972)
 - 13 Behrisch, R. "Summary of the international conference on ion surface interaction, sputtering and related phenomena, Garching, 25.-28. September 1972", Atomkernenergie 20, 164 (1972)
 - 14 Behrisch, R., B.M.U. Scherzer, H. Schulze "Dechanneling of Protons in Niobium Single Crystals", Radiation Effects 13, 33 (1972)
 - 15 Behrisch, R., H. Vernickel "Sputtering in a Fusion Reactor as a Function of Total Energy and Temperature of the Particles Bombarding the Wall", Proc. 7th Symp. Fusion Techn., Grenoble, October 1972, Eur 4938e, Luxemburg 1972, p. 27

⁺ Princeton University, New Jersey, USA

- 16 Behrisch, R., H. Vernickel "Sputtering in a Fusion Reactor as a Function of Total Energy and Temperature of the Particles Bombarding the Wall", 7th Symp. Fusion Techn., Grenoble, October 1972
- 17 Behrisch, R., H. Vernickel "The Wall Problem in Fusion Reactors", Int. Conf. Ion Surface Int., Garching, September 1972 (invited)
- Behrisch, R., s. Weißmann
- 18 Biskamp, D. "On Conventional and Unconventional Theory of Ion-Sound Turbulence", Nucl. Fusion 12, 85 (1972)
- 19 Biskamp, D., H. Welter "On the Validity of the Quasi-Linear Approximation for Turbulent Plasmas", Nucl. Fusion 12, 89 (1972)
- 20 Biskamp, D., H. Welter "Ion Heating in High-Mach-Number Oblique Shock Waves", Phys. Rev. Letters 28, 410 (1972)
- 21 Biskamp, D., K.U.v.Hagenow, H. Welter "Computer Studies of Current-Driven Ion-Sound Instability in Three Dimensions", Phys. Letters 39A, 351 (1972)
- 22 Biskamp, D., R. Chodura "On the Non-linear Electron-Cyclotron-Drift Instability", Nucl. Fusion 12, 485 (1972)
- 23 Biskamp, D., H. Welter "Structure of the Earth's Bow Shock", J. Geophys. Res. 77, 6052 (1972)
- 24 Biskamp, D., H. Welter "Numerical Studies of Magnetosonic Collisionless Shock Waves", Nucl. Fus. 12, 663 (1972)
- 25 Biskamp, D., R. Chodura "Asymptotic Behavior of the Electrostatic Current-Driven Cross-Field Instability", Bull. Am. Phys. Soc. 17, 851 (1972)
- 26 Biskamp, D., R. Chodura "Recent Developments in Computer Simulation of Plasmas", 5th European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Vol. II, Grenoble 1972
- 27 Biskamp, D. "Computer Simulation in Plasma Physics", Second EPS-General Conf., Wiesbaden 1972
- 28 Biskamp, D., R. Chodura "Asymptotic Behaviour of the Electrostatic Current-Driven Cross-Field Instability", Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, D 7 (1972)
- 29 Biskamp, D., R. Chodura "Recent Developments in Computer Simulation of Plasmas", Proc. V. Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Vol. II, 93 (1972)
- 30 Biskamp, D., R. Chodura "Development and Saturation of the Cross Field Current Driven Instability", Proc. V. Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Vol. I., 177 (1972)
- 31 Biskamp, D., R. Chodura "On the Non-Linear Electron-Cyclotron Drift Instability", Nucl. Fusion 12, 485 (1972)
- 32 Biskamp, D. "Numerische Simulationsrechnungen im IPP", Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich, 18. 4. 1972
- 33 Biskamp, D., R. Chodura "Asymptotic Behaviour of the Electrostatic Current-Driven Cross-Field Instability", 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, 3.-6.7.1972
- 34 Biskamp, D., R. Chodura "Recent Developments in Computer Simulation of Plasmas", 5th European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, 21. - 25. 8. 1972

- 35 Biskamp, D. "Computer Simulation in Plasma Physics" 2nd Conf. of the Europ. Phys. Soc., Wiesbaden, 3.-6.10.1972
- Bitter S. Elsner
- 36 Blaumoser, M., K. Freudenberger, G. Grieger, R. Jaenicke, J. Junker, A. Knobloch, J. Kolos, R.C. Kunze, H. Lohnert, B. Oswald, R. Pöhlchen, B. Streibl, H. Wobig, G.H. Wolf "Status and Technical Concept of the Garching Stellarator Wendelstein VII", Proc. of the 7th Symp. on Fusion Techn., Grenoble, 1972
- 37 Blauth, E.W. "Induzierte Elektronenemission", Meßtechnik 80, 193 (1972)
- Blauth, E.W. s. Rasskopf
- 38 Braun, W. "Holographic Interferometry at $\lambda = 3 \mu\text{m}$ for the Measurement of High-Beta Plasma Density Profiles", Proc. V. Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Vol. 1, 56 (1972)
- 39 Brederlow, G., K.J. Witte "Investigation of the discharge Structure in a rare gas alkali MHD generator", Proc. 12th Symp. on Eng. Aspects of MHD, Argonne, Ill., 27.-29.3.1972, I.9.1
- 40 Brederlow, G. "Physikalische Untersuchungen an Edelgas-MHD-Generatoren", Verh. DPG 3, 124 (1972)
- Brederlow, G. s. Witte
- 41 Breit, E., J. Gruber, A. Knobloch "Technical Aspects of Future Toroidal High-Beta-Experiments", Proc. 6th Symp. on Fusion Technology, Grenoble, 1972. Publ. EURATOM 1971, EUR 4938e, pg. 195 - 206
- 42 Brinkschulte, H., E. Fill, R. Lang "Spectral Output Properties of the Nd-POCl₃ Inorganic Liquid Laser", J. Appl. Phys. 43, 1807 (1972)
- Buchelt s. Andelfinger
- 43 Büchl, K. "Production of Plasma with a CO₂ TEA laser from solid hydrogen targets", J. Appl. Phys. 43, 1032 (1972)
- 44 Büchl, K., K. Eidmann, H. Salzmann, R. Sigel "Spectral investigation of light reflected from a laser produced deuterium plasma", Appl. Phys. Lett. 20, 3 (1972)
- 45 Büchl, K., H.J. Pfeiffer "Ein Hohlkugelkalorimeter zur Energiemessung von HochleistungsimpulsLasern", Z.f. angew. Physik 32, 359 (1972)
- 46 Bünde, R., H. Muntenbruch, S. Helm "The combustion MHD generator as a reserve plant in electricity supply system", Proc. 12th Symp. on Eng. Aspects of MHD, Argonne, Ill., 27.-29.3.1972, VI, 1.1
- 47 Bünde, R. "Andere Energiequellen und Direkterzeugung von elektrischer Energie", Brennstoff-Wärme-Kraft 24, 58 (1972)
- 48 Bünde, R., S. Helm, H. Muntenbruch "Der Verbrennungs-MHD-Generator als Sofortreserveaggregat in der Energieversorgung", Brennstoff-Wärme-Kraft 24, 94 (1972)
- 49 Bünde, R. "An Additional Application for the Kerosene Oxygen Fired MHD Generator US-German Workshop on MHD Systems Analysis", Bergbauforschungs-Institut, Essen, June 28 - 29, 1972
- 50 Bünde, R., J. Raeder, G. Zankl "Inclusion of Boundary Effects in a One Dimensional Calculation of Channel Flow US-German Workshop on MHD Generator Performance", IPP, Garching, June 26 - 27, 1972

Bünde, R. s. Zankl

- 51 Chodura, R. "Numerische Simulation von Plasmen", Plenarvortrag P 3, Frühjahrstagung DPG, Kiel, 1972
Verhandl. DPG (VI), 7, 83 (1972)

Chodura, R. s. Biskamp

- 52 Coburn, J.W.⁺⁺, E. Taglauer, E. Kay "Sputter-Injection of Molecular Species into a RF Glow Discharge"
25th Annual Gaseous Electronics Conference, London, Ontario, Canada, October 1972

Coburn, J. s. Kay

- 53 Correa, D., D. Lortz "A Class of Helically Symmetric MHD Equilibria", Nucl. Fusion 13, 127 (1973)

- 54 Correa, D., D. Lortz "A Class of Helically Symmetric MHD Equilibria, 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas,
Garching, 3.-6.7.1972 und 5th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, 21. - 25. 8. 1972

- 55 Corti, S., G. Lisitano, G. Pacher, H. Renner, H. Ringler, E. Würsching "Nonresonant Preionization in the Ohmic
Heated Stellarator W IIb", Bull. Am. Phys. Soc., Vol. II, 17, 1038 (1972)

- 56 Dänner, W. "Das Blanket des Fusionsreaktors - Probleme und Stand der Entwicklung" Vortrag im Hahn-Meitner-Institut
für Kernforschung, Berlin, April 1972, Tagungsbericht.

- 57 Dänner, W. "Lithium und Flibe als Kühlmittel für Fusionsreaktor-Blankets", Reaktortagung des DAeF, Hamburg, 1972

- 58 Dänner, W. "Lithium and Flibe as Coolants for Fusion Reactor Blankets", Proc. 7th Symp. on Fusion Reactor Techn.,
Grenoble, October 1972

- 59 Dänner, W. "Neutron Flux Asymmetry in Toroidal Geometries", Proc. 7th Symp. on Fusion Techn., Grenoble, Oct. 1972

- 60 Dänner, W. "Technologische Entwicklungen zum Fusionsreaktor", Vortrag zur Informationstagung für die Presse, IPP,
November 1972

- 61 Decker, G., D.L. Honea⁺⁺⁺ "Magnetic Probes with Nanosecond Response Time for Plasma Experiments", Journal of
Physics E.: Scientific Instr. Vol. 5, 481 (1972)

- 62 Decker, G., H. Röhr, W. Schneider⁺⁺⁺⁺, K. Hübner "Two-Photon Absorption and Direct Recombination in In Sb"
Phys. Lett. Vol. 41A, No. 4, S. 383

- 63 Decker, G., H. Herold, H. Röhr "Holography and Holographic Interferometry with Pulsed High Power Infrared Lasers",
Appl. Phys. Lett., 20, No. 12, 490 (1972)

- 64 Decker, G., A.E. Robson⁺⁺⁺⁺ "Instability of the Whistler Structure of Oblique Hydromagnetic Shocks", Phys. Rev.
Letters 29, No. 16 (1972)

Decker, G. s. Kornherr

⁺⁺ IBM-Research Laboratory San Jose Cal. USA

⁺⁺⁺ University of Texas, Austin, USA

⁺⁺⁺⁺ Institut für Angewandte Physik der Universität Heidelberg

⁺⁺⁺⁺ University of Texas, Austin, USA

- 65 Decker, G., H. Herold, H. Röhr "Holography and Holographic Interferometry with Pulsed High-Power Infrared Lasers", Calendar of the Spring Meeting 1972, of the Optical Soc. of Am., N.Y., post deadline papers.
- 66 Decker, G., M. Keilhacker, M. Kornherr, F. Lindemberger, H. Röhr "Vorwärtsstreuung von $10,6 \mu\text{m}$ CO_2 -Laserlicht an stoßfreien Stoßwellen", Verhandl. DPG (VI), 7, 102 (1972)
- 67 Derfler, H., F. Leuterer "Cyclotron harmonic waves in an inhomogeneous plasma, Part A: theory", Plasma Physics, 14, 473 (1972)
- Dixon s. Düchs
- Dommaschk s. Andelfinger
- 68 Düchs, D. "Fluid Models for Tokamak Plasmas", NRL-Report 7340, Naval Research, Laboratory, Washington, D.C., 20390, USA
- 69 Düchs, D., H.P. Furth, P.H. Rutherford "Skin Effect in Large Tokamaks", a) Nucl. Fusion 12, 341 (1972), b) Report MATT-885, Febr. 1972, Plasma Physics Laboratory, Princeton, University, Princeton, N.J. 08540, USA
- 70 Düchs, D., R.H. Dixon, R.C. Elton "Two-Dimensional Hard-Core Theta-Pinch Observations of Spiral Structure Associated with Initial Breakdown", a) Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, IPP-Report 1/127, July 1972, p. 111, b) NRL-Memorandum Report 2495, July 1972, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., 20390, USA
- 71 Düchs, D.F., H.P. Furth, P.H. Rutherford "Neoclassical Transport in Tokamaks and the Effects of Neutral Gas", a) Proc. 5th Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, Grenoble, 1972, Vol. I., p. 14 b) Report MATT-900, May 1972, Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, N.J. 08540, USA
- 72 Düchs, D.F., "Report on the 5th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Held in Grenoble, 21-25 August 1972," Nucl. Fusion 12, 715 (1972)
- 73 Düchs, D.F., H.P. Furth, P.H. Rutherford "Semi-Empirical Computer Model of the ST-Tokamak", Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, Vol. 17, No. 11, p 984 (1972)
- 74 Düchs, D. "Numerical Calculations for the Radial Transport in Tokamak Discharges", Laboratorio Gas Ionizzati, Frascati, Maggio 22, 1972
- 75 Düchs, D., R.H. Dixon, R.C. Elton "Two-Dimensional Hard Core Theta-Pinch Observations of Spiral Structure Associated with Initial Breakdown", 2nd Topical Conference on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, 3.-6.7.1972
- 76 Düchs, D.F., H.P. Furth, P.H. Rutherford "Neoclassical Transport in Tokamaks and the Effects of Neutral Gas", 5th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, Grenoble, 21-25.8.1972
- Düchs s. Hinton
- 77 Dum, C.T., D. Pfirsch "Azimuthal Electric Fields in Toroidal Transport", Nucl. Fusion 12, 297 (1972)
- 78 Dum, C.T., D. Pfirsch "Neoclassical Transport in a Strong Magnetic Field", 5th European Conf. on Plasma Physics, Grenoble 1972, Paper No. 13

- 79 Dum, C. T., D. Pfirsch "Neoclassical Transport in a Strong Magnetic Field", 5th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, 21-25.8.1972
- 80 Eckstein, W., H. Schäffler, H. Verbeek "Energy Distribution of Protons with Primary Energy of 15 keV Backscattered from a Nickel Single Crystal", Int. Conf. Ion Surface Int., Garching, Sept. 1972
- 81 Eckstein, W., B.M.U. Scherzer, H. Verbeek "Sputtering Yields of Niobium by H^+ and D^+ in the keV Range", Int. Conf. Ion Surface Int., Garching September 1972
- 82 Eckstein, W., H. Verbeek "Streuung von Protonen und Ne^+ -Ionen an einem Vanadium-Einkristall", Frühjahrstagung Regensburg, Verhandlg. DPG (VI), 7, 466 (1972)
- 83 Eckstein, W., H. Verbeek "Backscattering of Hydrogen and Rare Gas Ions from Metal Surfaces", J. Vac. Sci. Techn. 9, 612 (1972)
- Eckstein, W. s. N. Müller
- 84 Eidmann, K., P. Sachsenmaier, H. Salzmann "Optical Isolators for High-power Giant-Pulse Lasers", J. of Physics, 5, 56 (1972)
- Eidmann, K., s. Büchl
- 85 Eidmann, K., R. Sigel "Irradiation of solids with a neodymium glass laser", Conf. on Interaction of Laser Light with Matter, Marly le Roi 9-13.10.1972
- 86 Ellis, R., F. Rau "Plasmaproduktion mittels Elektronenzyklotronresonanz in toroidaler Multipolgeometrie", Verh. der DPG, 3, 96 (1972)
- 87 Elsel, W., H. Muntenbruch "Design study of superconducting dipole magnets for MHD generators", Proc. 12th Symp. on Eng. Aspects of MHD, Argonne, Ill., 27.-29.3.1972, VI. 9.1.
- 88 Elsner, A., W. Bitter, H. J. Jäckel, F. Rau "On the Cooling of Large Enthalpy System by Metallic Contacts in Vacuum", ICEC 4, Eindhoven, paper No 2, 1972
- Elton s. Düchs
- 89 Engelhardt, W. "Continuum Measurements on a Hydrogen Plasma", Physics of Fluids, 15, 2074 (1972)
- 90 Engelhardt, W., W. Köppendörfer, J. Sommer "Measurements of the Depopulation of the $2^3P_{0,1,2}$ Levels of Heliumlike Ions By Electron Collisions", Phys. Rev. A6, 1908 (1972)
- 91 Engelhardt, W., W. Köppendörfer, W. Schneider, J. Sommer "Analysis of the Energy Balance in the ISAR II Linear Theta-Pinch by Experimental and Computational Investigations", Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, C 7 (1972)
- 92 Ertl, K., E. Taglauer "Partial Pressure Analysis using a two-chamber gauge together with an Ion-Electron Converter"
- 93 Fill, E., K. Graf v. Finckenstein "A Comparison of the Performance of Different Laser Amplifier Media", IEEE J. of Quantum Electronics QE-8, 24-26 (1972)
- 94 Fill, E., K. Graf v. Finckenstein "A Comparison of the Performance of Different Laser Amplifier Media, IEEE J. of Quantum Electronics, Vol. 8, Nr. 1 (1972)

- 95 Fill, E. "Ein Nd-POCl₃-Laserverstärker" Z. für angewandte Physik, 32, 356 (1972)
- 96 Fill, E., H. Salzmann "Güteschalter für Laser", Teil 1: Laser 4/3, 41 (1972); Teil 2: Laser 4/4, 32 (1972)
- Fill, E. s. Brinkschulte
- 97 Finckenstein, K.Graf v.. "Konvergenz eines Differenzenverfahrens zur Lösung nichtlinearer Diffusionsgleichungen in Zylindersymmetrie", Tagung über Methoden und Verfahren der mathematischen Physik, Oberwolfach, 25.4.1972
- 98 Finckenstein, K.Graf v. "Differenzenmethoden zur Lösung nichtlinearer Diffusionsgleichungen", Tagung über Numerische und approximationstheoretische Behandlung von Funktionalgleichungen, Oberwolfach, 7.12.1972
- 99 Finckenstein, K.Graf v., K.U.v.Hagenow, A. Schlüter "Über invariante Kurven ebener Abbildungen", Festschrift zum 60. Geburtstag von C.F. v. Weizsäcker, 1972
- Finckenstein, K.Graf v. s. Fill
- Fink s. Andelfinger
- Freudenberger s. Blaumoser
- 100 Freund, J. "Untersuchung des Haloplasmas am Theta-Pinch ISAR I", Verhandl. DPG (VI), 7 (1972)
- 101 Fritzer, P., L.L. Lengyel, K.J. Witte "Self consistent calculation of the gasdynamic and electrical properties of a two dimensional MHD flow", Proc. 12th Symp. on Eng. Aspects of MHD, Argonne, 111., 27-29.3.72, III.7.1
- 102 Fünfer, E., M. Kaufmann, W. Lotz, M. Münich, J. Neuhauser, G. Schramm, U. Seidel "Toroidal High-Beta Stellarator Experiments on ISAR T1", Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, A 2 (1972)
- Furth s. Düchs
- Furth s. Hinton
- 103 Gattinger, A. "Gepulste UV-Strahlungsquelle zur Erzeugung eines hochionisierten Ausgangsplasmas niedriger Dichte", Z. Phys. 254, 424 (1972)
- 104 Gehre, O., H.M. Mayer, M. Tutter "Proagation of Microwaves in a Circular Waveguide", Z. f. Naturforschung 27a, 215 (1972)
- 105 Gensel, P., K.L. Kompa, J.R. MacDonald "Untersuchung der Schwingungsrelaxation in einem chemischen Fluorwasserstoff-Laser", Bunsentagung, Hamburg 1972
- 106 Gensel, P., K.L. Kompa, J.R. MacDonald "Laser amplifier investigation of hydrogen fluoride deactivation rates", 3rd Conf. on Chemical and Molecular Lasers, St. Louis, Missouri, IEEE J. Quant. Electr.
- Gensel s. Ahlborn
- Gernhardt s. Allgeyer
- 107 Goedbloed, J.P., D. Pfirsch, H. Tasso "Instability of a Pinch Surrounded by a Resistive Wall", Nucl.Fusion 12, 649 (1972)

- 108 Gondhalekar, A.M., F. Keilmann "Extreme Vorwärtsstreuung zur Ionentemperaturmessung in Tokamakplasmen", Verh. DPG 3, 115 (1972)
- 109 Green, B.J. "The Status of Toroidal Confinement in CTR", Dept. of Engineering National University, Canberra, A.C.T., Australia, Flinders University Bedford Park, South Australia
- 110 Green, B.J., P. Mulser "A Self Consistent Calculation of Ponderomotive Forces in the Laser Plasma Interaction," Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, p 381, Plenum Press (1972), Editors J.H. Schwarz, H. Hora
- 111 Green, B.J. "The Effect of Plasma Flow on Toroidal Confinement", Nucl. Fusion 12, 475 (1972)
- 112 Green, B.J. "The Effect of Plasma Flow on Toroidal Confinement", Center for Plasma-Physics and Thermonuclear Research, University of Texas, Austin, Texas, March 26, (1972)
- 113 Green, B.H., H.P. Zehrfeld "Stationary Toroidal Equilibria at Finite Beta", Gordon Research Conf. on Particle-Solid Interactions, Proctor Academy, Andover, N.H., Aug. 14-18 (1972)
- 114 Green, B.J. "Laser Fusion", Dept. of Engineering Physics, Australian National University, Canberra, A.C.T., School of Physics, Sydney University, Sydney, N.S.W., Australia, Dept. of Physics Univ. of Melbourne, Victoria
Green s. Zehrfeld
- 115 Grieger, G., R. Jaenicke, C.O.L. Juulman, C. Mahn, H. Renner, H. Ringler, G. Schilling, G.H. Wolf, J. Hugill "Effect of Rotational Transform on the Ohmically Heated Plasma in the W 11b-Stellarator", Plasma Phys. 15, 151 (1973)
Grieger, G. s. Blaumoser
Grieger s. Andelfinger
Grossmann s. Wilhelm
- 116 Grossmann, W., J.A. Tataronis "The Excitation of Waves and Resonances in High-Beta Plasmas", Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, B 6 (1972)
- 117 Grossmann, W., H. Krause, R. Wilhelm, H. Zwicker "Plasma Confinement in the Toroidal Belt-Pinch", Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, F 1 (1972)
- 118 Grossmann, W. "MHD-Stability Considerations of the Belt-Pinch", Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, F 8 (1972)
Grossmann, W. s. Tataronis
Grossmann, W. s. Wilhelm
- 119 Gruber, J.E. "Stoßstromanlage im MJ-Bereich für zukünftige Fusionsexperimente", Vortrag, Kolloquium IPP-Institut für Hochspannungsanlagen d. TU München, Mai 1972
Gruber, J.E. s. Breit
- 120 Gruber, O. "Dynamic Stabilization of the Helical $m = 1$ Instability in a Linear Screw Pinch", Z.Phys. 251, 333 (1972)
Gruber, O. s. Becker

- 121 Guckenberger, R., H. Heil "Design and Computer Evaluation of the Aperture Lens, the Electric Lens with the Shortest focal Length and the lowest Aperture Defect", Proc. 5th Europ. Conf. Electron Microscopy, Manchester, p 112 (1972)
- 122 Guckenberger, R., H. Heil "Design and Computer Evaluation of the Aperture Lens, the Electric Lens with the Shortest focal Length and the lowest Aperture defect", 5th Europ. Congr. Electron Microscopy, Manchester 1972, Ann. Meeting Am.Vac.Soc., Chicago, 1972
- Hagenow, v. s. v. Finckenstein
- Hagenow, v. s. Biskamp
- 123 Hahn, G. "Elektrische Leitfähigkeit in rekombinierenden Heliumplasmen", Verh. DPG 3, 125 (1972)
- 124 Heil, H. "The Design of a Scanning Ion Microscope of High Resolution", Symp. on Electron Microscopy, Istanbul, Mai 1972
- Heil, H. s. Guckenberger
- 125 Heiland, W. "Surface Topography from Ion Scattering", Gordon Conf. on Particle Solid Interaction, Andover, N.H., USA, August 1972 (invited)
- 126 Heiland, W. "Streuung von Ionen sowie Ionenreflexion und Neutralisation", Dechema-Tagung: Mod. Meth. der Oberflächenphysik, Frankfurt, Dezember 1972 (invited)
- 127 Heiland, W., E. Taglauer "Der Nachweis von Mehrfachstreuprozessen bei der Rückstreuung langsamer Ne^+ -Ionen von einer Ni-(110)-Oberfläche", Frühjahrstagung Regensburg, Verh. DPG (VI), 7, 465 (1972)
- 128 Heiland, W., E. Taglauer "The Early Stages of Surface Damage in the Case of Ar^+ Ion Bombardment of a Ni (110) Surface at Low Energies", Int.Conf. Ion Surface Ing., Garching, September 1972
- 129 Heiland, W., E. Taglauer "Energy Distribution of Low Energy Noble Gas Ions Backscattered from a Single Crystal Nickel Surface", Second Symp. Surf. Physics, Enshede (Holland), Juni 1972
- 130 Heiland, W., E. Taglauer "Investigation of Surface Topography of Oxygen on Nickel Single Crystals by Helium Ion Backscattering", J.Vac.Sci.Techn. 9, 620 (1972)
- Heiland, W. s. Müller
- Heiland, W. s. Taglauer
- Helms s. Bünde
- Herold, H. s. Becker
- Herold, H. s. Decker
- Herold, H. s. Decker
- 131 Herppich, G. "Die 500 kV Anlage zum Experiment Maximator", Vortrag, Kolloquium IPP-Institut für Hochspannungsanlagen der TU München, Mai 1972
- Herppich, G. s. Allgeyer

Hermann s. Andelfinger

- 132 Herrnegger, F. "On the Equilibrium and Stability of the Belt-Pinch", Proc. V. Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Vol. I., 26 (1972)
- 133 Herrnegger, F. "Belt-Pinch Equilibria with Smooth Current Distribution", Proc. 2nd Top. Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, F 2 (1972)
- 134 Herrnegger, F., J. Nührenberg "Expansion of Toroidal Equilibrium with finite Periodicity Length and $\ell = 0,1$ Fields in Leading Order", Proc. 2nd Top. Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, B 2 (1972)
- 135 Herrnegger, F., J. Nührenberg "Expansion of Toroidal Equilibrium with Finite Periodicity Length and $\ell = 0,1$ Fields in Leading Order", Proc. of the Second Top. Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, 49 (1972)
- 136 Hinton, F.L., J.C. Wiley, D.F. Düchs, H.P. Furth, P.H. Rutherford "Neoclassical Transport in Tokamaks in Banana/Plateau Regimes," Phys.Rev.Letters 29, 11 (1972)
- 137 Hofer, W.O. "Anisotropic Emission from HCP-Single Crystals", Int.Conf. Ion Surface Int., Garching, September 1972
- Hofmann, J. s. Andelfinger
- 138 Hohla, K., K.L. Kompa "Energy Transfer in a Photochemical Iodine Laser", Chem: Phys. Lett. 14, 445 (1972)
- 139 Hohla, K., K.L. Kompa "Kinetische Prozesse in einem photochemischen Jodlaser", Z. f. Naturforschg. 27a, 958 (1972)
- 140 Hohla, K., K.L. Kompa "Storage and Transfer of Energy in a Photochemical Iodine Laser", 3rd Conf. on Chemical and Molecular Lasers, St. Louis, Missouri, IEEE J. Quant. Electr.
- 141 Hohla, K., K.L. Kompa "5 nsec gigawatt iodine laser amplifier", 3rd Conf. on Chemical and Molecular Lasers, St. Louis, Missouri, IEEE J. Quant. Electr.
- 142 Hohla, K., K.L. Kompa "Energieübertragung in einem photochemischen Jodlaser", Bunsentagung Hamburg 1972
- 143 Hohla, K. K.L. Kompa "High power operation of a photochemical iodine laser", VII Int. Quantum Electronics Conf., Montreal, Kanada (1972)
- 144 Hohla, K., K.L. Kompa "A Gigawatt Iodine Laser", Conf. on Interaction of Laser Light with Matter, Marly le Roi 9 - 13.10.1972
- 145 Hora, H. "Fortschritte zur Kernfusion mit Lasern", Laser 4, 22 (1972)
- 146 Hora, H., D. Pfirsch "Influence of Fast Ion Losses in Inertially Confined Nuclear Fusion Plasma", Laser Interaction and Related Plasma Phenomena (Plenum Publishing Corp., N.Y., (1972)), Editors H.J. Schwarz and H. Hora
- 147 Hugill, J., R. Jaenicke, H. Renner, H. Ringler, J.-G. Wegrowe "Ohm'sche Heizung am W II b-Stellarator in Abhängigkeit von der Rotationstransformation $t = t_0 \pm t_p$ ", Verh. d. DPG 7, 96 (1972)
- Hugill, J. s. Grieger
- Jacobi s. Andelfinger

- 148 Jaeckel, H. J., A.P. Martinelli, F. Rau, S.L. Wipf "On the Performance of Nb₃Sn Test Coils for Levitated Multipoles in Liquid Helium and in Helium Gas up to 17° K", Proc. of the 1972 Appl. Superconductivity Conf., Annapolis, Maryland, USA, May 1-3, 1972 IEEE Pub. No. 72 CH 0682-5-TABSC, 325
- Jaeckel s. Elsner
- Jaeckel s. Rau
- Jaenicke s. Blaumoser
- Jaenicke s. Grieger
- Jaenicke s. Hugill
- Jakobus s. Allgeyer
- 149 Javel, P., W. Ohlendorf, G. Pacher, H. Pacher, J.-G. Wegrowe "Transit-Time-Magnetic-Pumping of Barium-Plasma in the Stellarator Wendelstein W 11a", Bull. Am. Phys. Soc., Vol. II, 17, 1029 (1972)
- Junker s. Blaumoser
- Juulman s. Grieger
- 150 Kaufmann, M. "Der Hoch-Beta-Stellarator", Plenarvortrag P 9, Frühjahrstagung DPG, Kiel 1972, Verhdl. DPG (VI), 7, 83 (1972)
- Kaufmann, M. s. Fünfer
- 151 Kay, E. ⁺⁺⁺⁺⁺, J. Coburn, E. Tauglauer "A Novel Quantitative Method for Identifying Sputtered Neutral Species", Int. Conf. Ion Surface Int., Garching September 1972
- Kay s. Coburn
- 152 Keilhacker, M., M. Kornherr, F. Lindberger, G. Maret, H. Niedermeyer, K.-H. Steuer "Sheath Formation and Ion Heating in Low Density High-Voltage Theta-Pinches", Proc. 2nd Top. Conf. on Pulsed High-Beta-Plasmas, Garching, IPP 1/127, D 3 (1972)
- 153 Keilhacker, M., M. Kornherr, G. Maret, H. Niedermeyer, K.-H. Steuer "Shock Heating of Plasmas to Thermonuclear Temperatures in a Megavolt Theta-Pinch", Proc. V. Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Vol. II, 234 (1972)
- 154 Keilhacker, M., M. Kornherr, F. Lindberger, G. Maret, H. Niedermeyer "Stoßwellenheizung von Plasmen zu thermodynamischen Temperaturen in einem Megavolt-Theta-Pinch.;" Verh. DPG (VI), 7, 103 (1972)
- 155 Keilhacker, M., M. Kornherr, G. Maret, H. Niedermeyer, K.-H. Steuer, "Piston Heating and Plasma Sheath Scaling in Low Density High-Voltage Theta-Pinches", Bull. Am. Phys. Soc. 17, 993 (1972)

⁺⁺⁺⁺⁺ IBM Research Laboratory San Jose, Cal. USA

- 156 Keilhacker, M., M. Kornherr, H. Niedermeyer, K.-H. Steuer "Experimental Study of Electron and Ion Heating in High-Beta Perpendicular Collisionless Shock Waves", *Cosmic Plasma Physics*, Ed. by K. Schindler, Plenum Press, N.Y., 327 (1972)
- Keilhacker, M. s. Decker
- Keilhacker, M. s. Kornherr
- 157 Keilmann, F. "An infrared schlieren interferometer for measuring electron density profiles", *Plasma Physics*, 14, 111 (1972)
- Keilmann, F. s. Gondhalekar
- Kerl, F. s. Allgeyer
- 158 Kerner, W., D. Pfirsch, H. Tasso "Determination of the Magnetic Field B in Vacuum for General Two-Dimensional MHD-Equilibria", *Nucl. Fusion*, Vol. 12, 433 (1972)
- 159 Klement, G., H. Wedler "3-Elektroden-Crowbar-Funkenstrecken mit simultaner Zündung", Vortrag, Kolloquium IPP-Institut für Hochspannungsanlagen d. TU München, Mai 1972
- 160 Klement, G., H. Wedler "Switch System for High-Beta-Experiments", *Proc. 7th Symp. on Fusion Technology*, Grenoble, October 1972
- Klüber s. Allgeyer
- 161 Knobloch, A. "Auf dem Weg zum Fusionsreaktor", Vortrag am Barkhof-Gymnasium, Bremen, anlässlich der Hauptversammlung der MPG, Juni 1972
- 162 Knobloch, A. "Scaling and Some Electrotechnical Problems in Tokamak Fusions Reactors", *Proc. Erice Int. Summer School, Sizilien*, September 1972
- Knobloch s. Allgeyer
- Knobloch s. Blaumoser
- Knobloch s. Breit
- Kolos s. Blaumoser
- Kompa s. Ahlborn
- Kompa s. Gensel
- Kompa s. Hohla
- Kompa s. Pummer
- 163 Köppendörfer, W., W. Schneider, J. Sommer "Conclusions on Linear Reactor Devices from Theoretical and Experimental Investigations of End Losses from Theta-Pinch Plasmas", *Proc. V. Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics*, Grenoble, Vol. I., 19 (1972)
- Köppendörfer, W. s. Engelhardt

- 164 Kornherr, M., G. Decker, M. Keilhacker, F. Lindenberg, H. Röhr "CO₂-Laser Scattering Measurements of Turbulence in a High-Beta Collisionless Shock Wave", Phys. Lett. 39A, 95 (1972)
- Kornherr, M. s. Decker
- Kornherr, M. s. Keilhacker
- Krause, H. s. Keilhacker
- Krause, H. s. Grossmann
- 165 Krüger, P., A.P. Martinelli "A 30 k e Superconducting Coil with Reduced External Field", Proc. 4th Intern. Cryogenic Engineering Conf. Eindhoven, Holland, Mai 1972
- 166 Krüger, P., A.P. Martinelli "A Remotely Operated Electro-Mechanical Cryogenic Switch 100 A, 1 μ to Infinite Resistance", Proc. ICEC 4, Eindhoven, Holland, Mai 1972
- 167 Krüger, P. "A Remotely Operated Electromechanical Switch, 100 A, 1 to Infinite Resistance", ICEC 4, Eindhoven, p 354 (1972)
- Kunze s. Blaumoser
- 168 Küppers, G., H. Tasso "Stability to Localized Modes for a Class of Axisymmetric MHD-Equilibria", Zeitschrift für Naturforschung, 27a, 23 (1972)
- 169 Lang, R. "Stimulierte Brillouin- und Ramanstreuung in einer aktiven Q-geschalteten Na-POCl₃-Flüssigkeitslaser", Frühjahrstagung der DPG, Kiel, März 1972
- Lang s. Brinkschulte
- Lengyel s. Fritzer
- 170 Leuterer, F. "Cyclotron harmonic waves in an inhomogeneous plasma, part b: experiments", Plasma Physics, 14, 499 (1972)
- Leuterer, F. s. Derfler
- 171 Liebl, H. "Ionen-Mikrosonden-Analysatoren", Meßtechnik 80, 358 (1972)
- 172 Liebl, H. "A Coaxial Combined Electrostatic Objective and Anode Lens for Micro-Probe Mass Analysers", Vacuum 22 (1972)
- 173 Liebl, H. "A Coaxial Combined Electrostatic Objective and Anode Lens for Micro Probe Mass Analysers", Conf. Vacuum Instr. and Meth. in Surface Studies, Guildford, England 1972
- 174 Liebl, H. "Ionen-Mikrosonden-Analysatoren", 6. Coll. über Metallkundliche Analyse, Wien, 23-25.10.1972 (invited)
- Liebl, H. s. Rasskopf
- Lindenberg, F. s. Decker
- Lindenberg, F. s. Keilhacker

- Lindenberger, F. s. Kornherr
- Lisitano s. Corti
- Lohnert s. Allgeyer
- Lohnert s. Blaumoser
- 175 Lortz, D. "Eigenwertschranken für die Hill'sche Gleichung", Tagung über Methoden und Verfahren der math. Physik, Oberwolfach, 25.4.1972
- 176 Lortz, D., E. Rebhan "Eigenvalue Bounds of Hill's Equation", ZAMM (1973)
- 177 Lortz, D. "A Simple Stationary Dynamo Model", Zeitschr. f. Naturforschung 27a, 1350 (1972)
- Lortz, D. s. Correa
- Lortz, D. s. Fünfer
- Ludescher s. Allgeyer
- Ludescher s. Pöhlchen
- MacDonald s. Gensel
- Malm s. Grieger
- Maret, G. s. Keilhacker
- 178 Martinelli, A.P., S.L. Wipf "Investigation of Cryogenic Stability and Reliability of Operation of Nb₃Sn Coils in He Gas Environment", Proc. Appl. Superconductivity Conf., May 1-3, 1972, Annapolis, Md., p 331 (IEEE Publ. No 72 CH 0682-6-TABSC)
- 179 Martinelli, A.P. "Use of Superconductors for Pulsed Experiments in Plasma Physics", Proc. NATO-AGARD Conf. Colorado Springs, June 1972
- 180 Martinelli, A.P. "On a Superconducting Coil System for a Large Tokamak Experiment", Proc. 7th Symp. on Fusion Reactor Technology, Grenoble, October 1972
- 181 Martinelli, A.P., S.L. Wipf "Investigation of Cryogenic Stability and Reliability of Operation of Nb₃Sn Coils in a Helium Gas Environment", Proc. of the 1972 Applied Superconductivity Conference, Annapolis, Maryland, USA, May 1972, IEEE Pub. No 72 CH 0682-5-TABSC, 331
- Martinelli, A.P. s. Jaeckel
- Martinelli, A.P. s. Krüger
- Martinelli, A.P. s. Rau
- Mayer s. Gehre
- Merkel s. Andelfinger

- 182 Müller, G., R. Süß "Parallele Funken in Zündkreisen von Kurzschlußfunkenstrecken" Vortrag, Kolloquium IPP-Inst. für Hochspannungsanlagen der TU-München, Mai 1972
- 183 Müller, G., S. Süß "Contribution to the Ignition Characteristics of Non-Decoupled Parallel Sparks", Conf. Publ. 2nd International Conf. on Gas Discharges, London, September 1972
- 184 Müller, G., S. Süß "Operating Characteristics of Spark Gaps and Bank Assembly for an Electron Ring Accelerator Experiment", Proc. 7th Symp. on Fusion Technology, Grenoble, October 1972
- 185 Müller, N., W. Eckstein "Elektronen-Spin-Polarisation bei der Feldemission aus EuS-bedeckten Wolframspitzen", Frühjahrstagung Regensburg, Verh. DPG (VI), 7, 464 (1972)
- 186 Müller, N., W. Eckstein, W. Heiland, W. Zinn "Electron Spin Polarization in Field Emission from EuS-Coated Tungsten Tips", Phys. Rev. Letters 29, 1651 (1972)
- Münich, M. s. Fünfer
- Mulser s. Green
- Muntenbruch s. Bünde
- Muntenbruch s. Elsel
- 187 Nakamura, T. "Ionisationsinstabilitäten in 2-Temperatur-MHD-Plasmen", Verh. DPG, 3, 125 (1972)
- 188 Nakamura, T. "Stability of the nonequilibrium MHD plasma in the regime of fully ionized seed", Proc. 12th Symp. on Eng. Aspects of MHD, Argonne, 111., 27.-29.3.1972. V.3.1
- Neuhauser, J. s. Fünfer
- Niedermeyer, H. s. Keilhacker
- 189 Nührenberg, J. "Special Time-Dependent Solutions of Diffusive Tokamak Equilibrium", Nucl. Fusion 12, 157 (1972)
- 190 Nührenberg, J. "Diffusive Toroidal Hydromagnetic Equilibria without PS-Enhancement", Nucl. Fusion 12, 383 (1972)
- Nührenberg, J. s. Herwegger
- Oetjen s. Poschenrieder
- Ohlendorf s. Javel
- Oswald s. Blaumoser
- Ott s. Andelfinger
- Pacher, G. s. Corti
- Pacher, G. s. Javel

- Pacher, H. s. Javel
- Pfeiffer s. Büchl
- 191 Pfirsch, D. "On the Existence of a Bootstrap Current in a Stellarator", Nucl. Fusion 12, 728 (1972)
- Pfirsch, D. s. Dum
- Pfirsch, D. s. Goedbloed
- Pfirsch, D. s. Hora
- Pfirsch, D. s. Kerner
- 192 Pillsticker, M. "Zündung von Hochspannungs-Funkenstrecken durch Laserlicht", Konf.-Veröffentl. Int. Symp. Hochspannungstechnik, München, März 1972
- 193 Pillsticker, M. "Triggerung von Funkenstrecken mit Laserlicht", Vortrag, Kolloquium IPP-Inst. f. Hochspannungsanlagen der TU München, Mai 1972
- 194 Pillsticker, M. "Effects of Spark Gap Geometry and Laser Components on the Laser-Triggered Electric Breakdown", Conf. Publ. 2nd Int. Conf. on Gas Discharges, London, September 1972
- 195 Pöhlchen, R., Ch. Ludescher "Calculation of Net Forces and Mechanical Stress in the Toroidal Field Coil System of the Wendelstein VII, Pulsator and Wega", Proc. 7th Symposium on Fusion Techn., Grenoble, October 1972
- Pöhlchen s. Blaumoser
- Pöhlchen s. Allgeyer
- 196 Poschenrieder, W.P. "Multiple-Focusing Time-of-Flight Mass Spectrometers, Part. II. TOFMS with Equal Energy Acceleration", Int. J. Mass Spectrom. Ion. Phys. 9, 357 (1972)
- 197 Poschenrieder, W.P., G.-H. Oetjen "New Directional and Energy Focusing Time of Flight Mass Spectrometers for Special Tasks in Vacuum and Surface Physics", J. Vac. Sci. Techn. 9, 212 (1972)
- 198 Pummer, H., K.L. Kompa "Investigation of a 1 Joule Pulsed Discharge initiated HF laser", Appl. Phys. Lett. 20, 356 (1972)
- 199 Puri, S., M. Tutter "Lower-hybrid resonance heating of a plasma in a parallel-plate waveguide", Proc. of the First Topical Conf. on RF Plasma Heating of the APS, Lubbock, Texas, 6.-8.7.1972
- 200 Puri, S. "Stochastic Acceleration - A Review", Proc. Symp. on Plasma Heating and Injection, Varenna, Italien, 1972 (Editrice Compositori, Bologna)
- 201 Raeder, J., G. Zankl "The Influence of the Combustor Parameters on the Generator Performance US-German Workshop on MHD-Generator Performance, ", IPP, Garching, June 26-27, 1972
- Raeder s. Bünde
- Raeder s. Zankl

- 202 Rasskopf, K., H. Liebl, E.W. Blauth "Double Chamber Partial Pressure Gauge", J. Vac. Sci. Techn. 9, 492 (1972)
- 203 Rau, F., H.J. Jaeckel, A.P. Martinelli, S.L. Wipf "On the Performance of Nb₃Sn Test Coil for Levitated Multipoles, in LHe and in He Gas up to 17 K", Proc. Appl. Superconductivity Conf., Annapolis, MD., p. 325, (1972)
(IEEE Publ. No 72 CH 0682-5-TABSC)
- Rau s. Ellis
- Rau s. Elsner
- Rau s. Jaeckel
- 204 Rebhan, E. "Effects of Anisotropic Plasma Temperature on the Frequency Shift in Resonant Cavities", 5th Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Aug. 21-25. 1972
- 205 Rebhan, E. "One the Stability of Helically Symmetric $n=2$ and $n=3$ Equilibria", 5th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma, Grenoble, 21-25 Aug. 1972
- Rebhan, E. s. Lortz
- 206 Rehker, S., W. Wobig "A Stellarator Coil System without Helical Windings", 7th Symp. on Fusion Techn., Grenoble, (1972)
- 207 Renner, H., U. Weber, J.-G. Wegrowe, E. Würsching "Elektronendichtebestimmung am W II b mit einem 5-Strahlinterferometer 70 GHz", Verh. DPG 7, 115 (1972)
- Renner, H. s. Corti
- Renner, H. s. Grieger
- Renner, H. s. Hugill
- 208 Ringler, H. "Measurement of Nonthermal Oscillations at the Plasma Frequency and its Harmonics in a Magnetized Arc Plasma, Using the High Frequency Stark Effect", Phys. Letters 41A, 15 (1972)
- 209 Ringler, H. "Beobachtungen über thermische Plasmaschwingungen mit Hilfe des HF-Stark-Effektes in einer Bogenentladung", Verh. DPG 3, 95 (1972)
- Ringler, H. s. Corti
- Ringler, H. s. Grieger
- Ringler, H. s. Hugill
- 210 Röhr, H. "Meßmethoden an heißen Plasmen", Physik unserer Zeit 3, 67 (1972)
- Röhr, H. s. Decker
- Röhr, H. s. Kornherr
- Roos s. Allgeyer

- Rutherford s. Düchs
- Rutherford s. Hinton
- Schäffler s. Eckstein
- Scherzer s. Behrisch
- Scherzer s. Eckstein
- Schilling, H.B. s. Andelfinger
- Schilling, G. s. Grieger
- Schlüter s. Andelfinger
- Schlüter s. v. Finckenstein
- 211 Schmitter, K.H. "Aspekte des Fusionsreaktors", Vortrag, KTG, Sektion Erlangen-Nürnberg, Januar 1972
- 212 Schmitter, K.H. "Optimization of Superconducting Toroidal Magnets for Tokamak Fusion Reactors", Proc. Int. Summer School, Erice, Sizilien, September 1972
- 213 Schmitter, K.H. "Thermonukleare Fusionsreaktoren - Stand und Aussichten", Atomwirtschaft-Atomtechnik 11 (1972) und Deutsche Reaktortagung 1972, Hamburg
- 214 Schneider, W. "Investigation of the Relation between Compression, Relaxation, and End Losses in the Late Phases of Theta-Pinch Discharges by Means of a two-Dimensional MHD-Computer Programm", Z.Physik 252, 147 (1972)
- 215 Schneider, W. H.A.B. Bodin⁺⁺⁺⁺⁺, J. McCarton⁺⁺⁺⁺⁺, I.K. Pasco⁺⁺⁺⁺⁺ "Experimental and Two-Dimensional Computational Study of End Losses from a Theta Pinch", Phys. Fluids 7, 1341 (1972)
- Schneider, W. s. Engelhardt
- Schneider, W. s. Köppendörfer
- Schramm, G. s. Fünfer
- Schulze, H. s. Behrisch
- 216 Schumacher, U. "Fast Electron Ring Compression and Magnetic Acceleration with a Single Coil", Symp. on Collective Methods of Acceleration, Dubna, USSR, 1972
- Schumacher, U. s. Andelfinger

+++++ UKAEA Culham Lab.: Berksh., England

- Sachsenmaier s. Eidmann
- 217 Saison, R. "Effects of Anisotropic Plasma Temperature on the Frequency Shift in Resonant Cavities", 5th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Aug. 21 - 25, 1972
- 218 Saison, R. "Effects of Anisotropic Plasma Temperature on the Frequency Shift in Resonant Cavities", 5th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Conf. Proc. No. 144 (1972)
- 219 Salat, A. "Wave Propagation in Plasmas with Fluctuations", Plasma Physics, 14, 805 (1972)
- 220 Salzmann, H. "The Applicability of Fourier's Theory of Heat Conduction on Laser Produced Plasmas", Phys. Lett. 41A, 363 (1972)
- 221 Salzmann, H. "Production of hot plasmas of solid state density by ultrashort laser pulses", J. Appl. Physics (1972)
- Salzmann, H. s. Büchl
- Salzmann, H. s. Eidmann
- Salzmann, H. s. Fill
- 222 Sanderson, J.J. ++++++ "Perpendicular Collisionless Shock Wave Instability", Plasma Physics, 14, 959 (1972)
- Seidel, U. s. Fünfer
- Sigel s. Büchl
- Sigel s. Eidmann
- Sigmund s. Weißmann
- Siller s. Andelfinger
- Sommer, H.J. s. Engelhardt
- Sommer, H.J. s. Köppendörfer
- 223 Söll, M., S.L. Wipf, G. Vogl "Change in Critical Current of Superconducting NbTi by Neutron Irradiation", Proc. Appl. Superconductivity Conf., May 1-3, 1972, Annapolis, Md. p 159, (IEEE Publ. No. 72 CH 0682-5-TABSC)
- 224 Söll, M., W.L. Wipf "Flux Flow Properties of Bare NbTi Wire", Proc. 4th Int. Cryogenics Engineering Conf., Eindhoven, May 1972
- 225 Söll, M. "Neutronbestrahlung von NbTi" Vortrag Technische Univ. München, Februar 1972
- 226 Söll, M. "Influence of Radiation Damage to Superconducting NbTi Coils for Fusion Reactors", Proc. 7th Symp. on Fusion Technology, Grenoble, October 1972

+++++ Gastforscher der Univ. of St. Andrews, Scotland

- 227 Söll, M., G. Vogl, S.L. Wipf "Change in Critical Current of Superconducting NbTi by Neutron Irradiation", Proc. Appl. Superconductivity Conf., Annapolis, May 1972
- Söll, s. Wipf
- Süß s. Müller
- 228 Staib, P. "An Improved Retarding Field Analyser", J. Phys. E5, 484 (1972)
- 229 Staib, P. "A New Compact Energy Analyser for Auger and ESCA Spectroscopy", Vacuum 28, 481 (1972)
- 230 Staib, P. "Auger-Elektronen spektroskopische Untersuchungen an Glimmer", Frühjahrstagung Regensburg, Verh. DPG (VI), 7, 475 (1972)
- 231 Staib, P. "A Depth Analysis of Cleaved Mica Surfaces Monitored by Auger-Spectroscopy", Int. Conf. Ion Surface Int., Garching, September 1972
- 232 Staib, P. "A New Compact Analyser for Auger- and ESCA Spectroscopy", Conf. Vacuum Instr. and Methods in Surf. Stud., Guildford, England 1972
- 233 Staib, P. "Prediction of the Relative Intensities of Auer Lines in Mica", Phys. Letters 41A, 3 (1972)
- Steuer, K.-H. s. Keilhacker
- 234 Streibl, B. "Magnetic Forces on the Helical Windings of a Stellarator and the Resulting Deformation of the Supporting Structure", Proc. of the 7th Symp. on Fusion Technology, Grenoble, 1972
- Streibl, B. s. Blaumoser
- 235 Taglauer, E., W. Heiland "Investigation of the Chain Effect in the Scattering of Low Energy Noble Gas Ions from a Ni (110) Surface", Surf. Sci. 33, 27 (1972)
- Taglauer, E. s. Coburn
- Taglauer, E. s. Ertl
- Taglauer, E. s. Heiland
- Taglauer, E. s. Kay
- 236 Tanimoto, M. "Cryogenic Experimental Device for Production of Solid Pellets", Proc. 7th Symp. on Fusion Technology, Grenoble, 24-27.10.1972
- Tasso, s. Goedbloed
- Tasso s. Kerner
- Tasso s. Küppers

- 237 Tataronis, J.A., W. Grossmann "On the Spectrum of Ideal MHD", Proc. 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas, Garching, IPP 1/127, B 5 (1972)
- Tutter s. Gehre
- Tutter s. Puri
- Ulrich s. Andelfinger
- 238 Unsöld, E. "Microwave Plasma Generation by end/on and side/on Irradiation in the Pressure Range 0,1 - 10 mTorr of Hydrogen", Z. Physic 251, 254 (1972)
- Verbeek s. Eckstein
- 239 Vernickel, H. "Wall Erosion in a Fusion Reactor due to Sputtering", Nucl. Fusion 12, 386 (1972)
- 240 Vernickel, H. "Plasma-Wall-Interaction", Int. School on Fusion Reactor Technology, Erice, Italien, Sept. 1972 (invited)
- Vernickel, H. s. Behrisch
- Vogl s. Söll
- 241 Volk, R. "Operating Conditions of a CW Cyanide Laser with Mixtures of Methane, Nitrogen and Helium as Working Medium", Phys. Lett. A 42, 321 (1972)
- Volk, R. s. Zankl
- Weber s. Renner
- Wedler s. Klement
- Wegrowe s. Hugill
- Wegrowe s. Javel
- Wegrowe s. Renner
- 242 Weichselgartner, H. "Die Abtrennung des im Blanket eines Fusionsreaktors erbrüteten Tritiums", Vortrag Hamburg-Reaktortagung, Mai 1972
- 243 Weichselgartner, H. "Tritium Separation and Recovery System Using a Fluidized Bed", Proc. 7th Symposium on Fusion Reactor Technology, Grenoble, October 1972
- 244 Weißmann, R. R. Behrisch "Messung sehr kleiner Zerstäubungsraten mit Hilfe der Rutherford-Rückstreuung", Frühjahrstagung Regensburg, Verh. DPG (VI), 7, 475 (1972)
- 245 Weißmann, R., R. Behrisch "Contribution of Backscattered Ions to Sputtering Yields Depending on Primary Ion Energy", Int. Conf. Ion Surface Int., Garching, September 1972

- 246 Weißmann, R., P. Sigmund "Calculation of Backscattering and Sputtering for Light Ions Incident on Random Targets", Int. Conf. Ion Surface Int., Garching, September 1972
- Welter s. Biskamp
- 247 Wesner, F. "Kapazitive Spannungsteiler zur Messung rascher Spannungsänderungen bis 200 kV", Vortrag Kolloquium IPP-Institut f. Hochspannungsanlagen der TU München, Mai 1972
- Wiley s. Hinton
- 248 Wilhelm, R., H. Zwicker, P. Grossmann "Plasmaeinschluß im toroidalen Belt-Pinch", Verhandlg. DPG (VI), 7, 107 (1972)
- Wilhelm, R. s. Grossmann
- 249 Wimmel, H.K. "Tachyons and Cerenkov Radiation", Natur Physical Science, 236, 79 (1972)
- 250 Wipf, S.L. "Supraleitende Energiespeicher", Sommer Schule über Anwendungen von Supraleitung in der Elektrotechnik und Hochenergiephysik, Okt. 9-13, 1972 Titisee/Schwarzwald
- 251 Wipf, S.L. "Applications of Superconductivity in Plasma Physics", Vortrag, U. of Lancaster, England, März 1972
- 252 Wipf, S.L. "Induktive Energiesteigerung", Vortrag Kernforschungszentrum Karlsruhe, Januar 1972
- 253 Wipf, S.L., M. Söll "Flox-Flow Properties of Bare NbTi Wire", ICEC 4, Eindhoven, p 159, (1972)
- Wipf, S.L. s. Jäckel
- Wipf, S.L. s. Martinelli
- Wipf, S.L. s. Rau
- Wipf, S.L. s. Söll
- 254 Witkowski, S. "Laser Plasma Work at IPP Garching", Japan/Us seminar: Laser interaction with matter, Inst. of Laser Eng., Osaka Univ., Japan, 24 - 30.9.1972
- 255 Witkowski, S. "Laser Plasma Studies at Garching", Conf. on Interaction of Laser with Matter, Marly le Roi, 9-13.10.1972
- 256 Witte, K.J., G. Brederlow "Magnetische Kontraktion in 2-Temperatur-MHD-Plasmen", Verh. DPG 3, 125 (1972)
- Witte s. Brederlow
- Witte s. Fritzer
- Wobig s. Blaumoser
- Wobig s. Rehker
- Wolf s. Blaumoser

Wolf s. Grieger

Würsching s. Corti

Würsching s. Renner

257 Zankl, G. "Some Experimental Problems in the Temperature Measurements at the Garching Combustion MHD Generator", US-German Workshop on MHD Plasma Diagnostics, Stanford, Univ., March 22-24, 1972

258 Zankl, G., J. Raeder, R. Bünde "The influence of various loss mechanisms on the flow parameters of a seed combustion plasma", Proc. 12th Symp. on Eng. Aspects of MHD, Argonne, Ill., 27-29.3.1972, III.1.1

259 Zankl, G., R. Volk "Some Remarks Concerning Electrical Conductivity Measurements at the Garching Combustion MHD Generator", US-German Workshop on MHD Plasma Diagnostics, Stanford, Univ. Calif., March 22-24, 1972

Zankl s. Bünde

Zankl s. Raeder

260 Zehrfeld, H.P., B.J. Green "Stationary Toroidal Equilibria at Finite Beta", Nucl. Fusion 12, 569 (1972)

Zehrfeld s. Green

Zinn s. N. Müller

261 Zwicker, H. "Toroidal Confinement of High-Beta Plasmas in Screw-Pinch like Configurations", Atomkernenergie (ATKE) 19, 184 (1972)

262 Zwicker, H., R. Wilhelm "Toroidal Confinement in Screw-Pinch with Non-Circular Plasma Cross Section", Proc. V. Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Grenoble, Vol. II, 59 (1972)

Zwicker s. Grossmann

Zwicker s. Wilhelm

Laborberichte

- IPP 1/124 Schneider, W. "Investigation of the Relaxation between Compression, Relaxation, and End Losses in the late Phases of Theta Pinch Discharges by means of a two-Dimensional MHD-Computer Programme"
- IPP 1/125 Freund, J. "Entstehung und Eigenschaften des Halo bei Pinch-Plasmen"
- IPP 1/126 Gattinger, A. "Gepulste UV-Strahlungsquelle zur Erzeugung eines hochionisierten Ausgangsplasmas niedriger Dichte."
- IPP 1/127 Lotz, W., "Proceedings of the Second Topical Conference on Pulsed High-Beta Plasmas"
- IPP 1/128 Sanderson, J.J.⁺ "A Review of Linear, $\underline{E} \times \underline{B}$ Drift Instabilities"
- IPP 1/129 Biskamp, D., R. Chodura "Collisionless Dissipation of a Cross-Field Electric Current."
6/112
- LA-5019-MS Kaufmann, M. "The Low-Density Limit of the Theta-Pinch" (szet in Los Alamos, Univ. of Los Alamos, N.M.)
- IPP 2/203 Grieger, G., H. Hugill, R. Jaenicke "Effect of Rotational Transform on the Ohmically Heated Plasma in the W II b-Stellarator", May 1972
- IPP 2/204 Grieger, G. "Project Wendelstein VII", June 1972
- IPP 2/205 Hoffmann, F.M. "Dynamische Stabilisierung und parametrische Anregung von Instabilitäten in Flüssigkeitsgrenzschichten", Sept. 1972
- IPP 2/206 Barberio-Corsetti, P. "Force-Free Helical Equilibria", Oktober 1972
- IPP 6/101 Green, B.J. "The Effect of Plasma Flow on Toroidal Confinement"
- IPP 6/102 Biskamp, D., H. Welter "Ion Dissipation in High Mach Number Oblique Shocks"
- IPP 6/103 Kerner, W., D. Pfirsch, H. Tasso "Determination of the Magnetic Field B in Vacuum for General Two-dimensional MHD Equilibria"
- IPP 6/104 Meyer-Spasche, R. "Ein Verfahren zur Lösung des Stabilitätsproblems für Komplexe Matrizen"
- IPP 6/105 Dum, D.T. "On the Role of Azimuthal Electric Fields in Toroidal Transport"
- IPP 6/106 Meyer-Spasche, R. "A Constructive Method of Solving the Liapounov Equation for Complex Hessenberg Matrices"
- IPP 6/107 Green, B.J., H.P. Zehrfeld "Stationary toroidal Equilibria at Finite Beta"

⁺ Gastforscher der Univ. of St. Andrews, Scotland

- IPP 6/108 Riedl, A.B. "Theorie der partiellen Differenzgleichungen, Anfangswertprobleme"
- IPP 6/109 Höhn, W. "Differenzschemata für Hyperbolische Systeme"
- IPP 6/110 Küppers, G., A. Salat, H.K. Wimmel "Current and Fields Induced in Plasmas by Relativistic Electron Beams with Arbitrary Radial and Axial Density Profiles"
- IPP 6/111 Küppers, G., A. Salat, H.K. Wimmel "Macroscopic Equilibria of Relativistic Electron Beams in Plasmas"
- IPP 6/112 Biskamp, D., R. Chodura "Collisionless Dissipation of a Cross-Field Electric Current"
- IPP 6/113 Gräff, P. "Das Umkehrproblem der Turbulenztheorie"
- IPP 6/114 Hofmann, I. "Widerstandsinstabilitäten in Plasmen mit Scherströmung"
- IPP 6/115 Knausenberger, H., R. Meyer-Spasche "Ein Algorithmus zur Bestimmung von (n) .
- IPP IV/31 Pummer, H. "Untersuchungen am Spektrum eines elektrisch angeregten Fluorwasserstoff-Lasers"
- IPP IV/32 Bünde, R., H. Muntenbruch, S. Helm "Stromerzeugungskosten und Anwendungsmöglichkeiten von Kurzzeit-Verbrennungs-MHD-Generatoren"
- IPP IV/33 Hohla, K. "Photochemischer Jodlaser: Kinetische Grundlagen für den Riesenpulsbetrieb"
- IPP IV/35 Volk, R. "Betriebsbedingungen eines CW-Zyanlasers im Hinblick auf die Plasmadiagnostik im Kurzzeit-MHD-Generator"
- IPP IV/36 Salvat, M. "Leistung von MHD-Generatoren und thermodynamischer Wirkungsgrad von geschlossenen MHD-Kraftwerksanlagen"
- IPP IV/37 Puri, S., M. Tutter "Lower-Hybrid-Resonance Heating of a Plasma in a Parallel-Plate Waveguide"
- IPP IV/38 Wanner, J. "Untersuchungen an chemischen Fluorwasserstoff-Lasern. Die Messung der Geschwindigkeitskonstanten einiger Reaktionen von Fluoratomem"
- IPP IV/39 Gehre, O. "Aufbau und Betrieb eines HCN-Lasers für Streuung an Wellen in stationären Plasmen"
- IPP IV/40 Mennicke, H. "Beobachtung von stimulierter Raman-Antistokesstrahlung höherer Ordnung und deren Bedeutung für die Startphase der Plasmaerzeugung durch Laser"
- IPP IV/41 Sardei, F. "Instationäre Prozesse der Wechselwirkung zwischen stoßwellenerzeugten Plasmaströmungen und Magnetfeldern - eine theoretische Untersuchung"
- IPP IV/42 Puri, S., M. Tutter "Dispersion Curves for the Generalized Bernstein Modes"
- IPP IV/43 Krause, H. "Apparatur zur Herstellung fester Deuteriumstäbchen"
- IPP IV/44 Puri, S. "Stochastic Acceleration - A Review"
- IPP IV/45 Tutter, M., S. Puri "Wellenfortpflanzung im anisotropen, zylindersymmetrisch inhomogenen, hohlrohrbegrenzten Plasma"

- IPP IV/46 Eidmann, K., R. Sigel "Evidence of Stimulated Backscattering of Laser Radiation from a Laser Produced Plasma"
- IPP IV/49 Zimmermann, W., H. Muntenbruch "Untersuchung der Relaxationseffekte hinter sekundären Stoßfronten in stoßwellengeheizten und teilionisierten Argonplasmen"
- IPP IV/50 Hora, H. "Optimized Laser Pulses for Pellet Heating at Refuelling Stellarators"
- IPP IV/53 Elsel, W., H. Muntenbruch "Studie zum Bau eines supraleitenden Satelpulmagneten ($B = 5$ Tesla) für einen 10 MW-Verbrennungs-MHD-Generator"
- IPP 9/1 Eckstein, H. Verbeek "Stigmatisch fokussierende homogene magnetische Sektorfelder"
- IPP 9/2 Meyer, E. "Starkfokussierendes Oszillotron"
- IPP 9/4 Vernickel, H. "Surface Problems in Plasma Physics and Fusion Research"
- IPP 9/5 Staib, P. "An Improved Retarding Field Analyser"
- IPP 9/6 Heil, H., R. Guckenberger "Die sehr hellen Feldionisations- und Feldverdampfungionenquellen, einige Anwendungen ein Strahl- und Ablensystem"
- IPP 9/7 Eckstein, W., H. Verbeek "Eine Apparatur zur Untersuchung der Einwirkung von Ionen im Energiebereich von 5 - 20 keV auf Metalloberflächen"
- IPP 0/10 Schumacher, U. "A single turn coil for fast electron ring compression and magnetic expansion acceleration"
- IPP 0/11 Luccio, A.U., U. Schumacher, E. Springmann "Numerical calculations of the electron inflection into a compressor with an additional B -field"
- IPP 0/12 Dommaschk, W. "Computation of accelerating electrodes for a relativistic high current electron beam tube"
- IPP 0/13 Andelfinger, C., W. Ott "Entwicklung einer 1 kA, 2 MeV Elektronenröhre"
- IPP 0/14 Reiser, M. "On the Equilibrium orbit and linear oscillations of charged particles in axisymmetric $E \times B$ fields and application to the electron ring accelerator"
- IPP 4/74 Werner, F. "Servosystem zur automatischen Aufzeichnung von Potentialfeldverteilungen in einem elektrolytischen Trog"
- IPP 4/95 Amenda, W. "Variable Temp. Cryostat in Superconducting Coil for Studying Superconductivity in a Gas Environment"
- IPP 4/96 Oswald, B. "Berechnungsgrundlagen, Optimierung und Kostenfaktoren normalleitender kryotechnischer und supraleitender Magnete für die experimentelle Plasmaphysik"
- IPP 4/97 Dänner, W. "Lithium und Flibe als Kühlmittel für Fusions-Reaktor-Blankets"

- IPP 4/98 Wipf, S.L., M. Söll "Flux-Flow Properties of Bare NbTi Wire"
- IPP 4/99 Söll, M., S.L. Wipf, G. Vogl "Change in critical Current of Superconducting NbTi by Neutron Irradiation"
- IPP 4/101 Dänner, W. "Neutron Flux Asymmetry in Toroidal Geometries"
- IPP 4/102 Pflsticker, M. "Einfluß optischer Größen beim Zünden von Funkenstrecken durch Laserlicht"
- IPP 4/103 Dänner, W. "Technologische Entwicklungen zum Fusionsreaktor"
- IPP 4/104 Söll, M. "Einfluß von Strahlenschäden auf die Eigenschaften eines Supraleiters"
- IPP 4/105 Knobloch, A. "Scaling and Some Electrotechnical Parameters in Tokamak Fusion Reactors"
- IPP 4/106 Fill, E., H. Baumhacker, F. Hofmeister "Ein aktiv modengekoppelter TEA-CO₂-Laser mit Pulselektionssystem"

Interne Berichte der IPP-Gruppe des IPP / M.A.N.-Projektes

- Elsel, W. "Studie zum Bau eines supraleitenden Dipolmagneten für einen 10 MW-Kurzzeit-MHD-Generator" Januar 1972
- Bünde, R., K. Freudenberger, R. Jaenicke, O. Klüber, M. Kottmair, H. Muntenbruch "Stellungnahme zu den Möglichkeiten der Verwendung von Kurzzeit-Verbrennungs-MHD-Generatoren bei der Energieversorgung von Fusionsexperimenten"
- Zankl, G., R. Volk "Beiträge zum "Workshop on MHD Plasma Diagnostics", Stanford Univ., Stanford, Calif., 22.-24.3.1972
- Bünde, R., W. Elsel, S. Helm, H. Muntenbruch, J. Raeder, G. Zankl "Papers for the XII. US-MHD-Symposium Argonne Natl. Lab., Argonne, Ill., 27.-29.3.1972
- Hofmeister, F., R. Volk, G. Zankl "Meßwertübertragung durch Trennverstärker mit optischen Kopplern", 15.4.1972
- Volk, R., G. Zankl "Das Meßwertübertragungssystem am MHD-Experimentiergenerator", 15.4.1972
- Zankl, G., Ch. Dorn "Messung der elektrischen Leitfähigkeit eines Kerosen-Sauerstoff-Verbrennungsgases mit Kaliumoktoat als Saatmittel auf dem Prüfstand im IPP", 15.4.1972
- Zankl, G., Ch. Dorn "MHD-Versuche mit Kerosen und Kaliumoktoat", 20.4.1972
- Dorn, Ch., G. Zankl, J. Raeder "Leitfähigkeitsmessungen mit dem Slantwall-Kanal D 45/1", 30.4.1972
- Muntenbruch, H., E. Sebastian "Entwicklung und Test von Werkstoffen für MHD-Kanäle", 30.4.1972
- Volk, R. "Versuchsbetrieb des Kurzzeit-MHD-Generators mit Benzol als Grundtreibstoff", 30.4.1972
5. Halbjahresbericht der Entwicklungsgemeinschaft MAN-IPP "10 MW-10 sec-MHD-Kurzzeitgenerator" für den Zeitraum 1.11.1971 bis 30.4.1972
- Muntenbruch, H. "Kommentar zur Studie der Siemens AG "Zum Bau eines Supramagneten für MHD-Generatoren", 20.6.1972
- 2nd US-German Workshop on Problems Relating to Open Cycle MHD Energy Conversion "Performance of Combustion MHD Generator" Resumes, Conclusions, Remarks Garching, 26 - 27.6.1972
- Proceedings of the 2nd US-German Workshop on Problems Relating to Open Cycle MHD Energy Conversion "Performance of Combustion MHD Generators", Garching, 26. - 27.6.1972
- Bünde, R., J. Raeder, G. Zankl "Beiträge zum Workshop on MHD-Generator Performance" MPI f. Plasmaphysik, Garching, 26.-27.6.1972
- Muntenbruch, H. "Entwicklung von Wandmaterialien für Verbrennungs-MHD-Generatoren I: F. u. E. Arbeiten des Battelle Instituts e.V., Frankfurt/Main", 15.7.1972
- Eustis, R.H., H. Muntenbruch "Memos on the IPP open Cycle MHD Generator Project", August 1972
- Die Wirtschaftlichkeit von Verbrennungs-MHD-Kraftwerken - Leistungs- und Kostenbilanz, Stromgestehungskosten.
Essen, Erlangen, Heidelberg, Jülich, München 15.9.1972
- Zankl, G., J. Raeder, R. Bünde "Einige experimentelle und theoretische Ergebnisse am IPP-MAN-Verbrennungs-MHD-Generator" 21.9. 1972

Muntenbruch, H., E. Sebastian "Die Inbetriebnahme des IPP-5 Tesla-Sattelspulenmagneten", 30.10.1972

6. Halbjahresbericht des IPP (Stand-by-Programm) für die Zeit vom 1. Mai 1972 an.

Patente-Anmeldungen

Glock, E., F. Lindberger "Photoelektronenvervielfacher", DBP Nr. 2058283

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.