

J A H R E S B E R I C H T 1966

des

Institutes für Plasmaphysik GmbH
München - Garching

I N S T I T U T F Ü R P L A S M A P H Y S I K

G A R C H I N G B E I M Ü N C H E N

764

Der vorliegende Bericht ist eine vertraulich abgegebene Information.

Das Recht der Veröffentlichung, Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung in fremde Sprachen des Originaltextes, einschließlich der Zeichnungen, im ganzen oder teilweise, von Auszügen oder Zusammenfassungen, sowie des technischen oder wissenschaftlichen Inhaltes des Berichtes bleibt ausschließlich dem Institut für Plasmaphysik vorbehalten; Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung.

Das Institut für Plasmaphysik behält sich ferner die ausschließliche Verwertung der in dem Bericht enthaltenen Information zur Erlangung von gewerblichen Schutzrechten, insbesondere Patent- und Gebrauchsmusterrechten im In- und Ausland vor. Benutzungshandlungen die auf Grund der aus diesem Bericht erlangten Kenntnisse vorgenommen werden, können kein Vorbenutzungsrecht gemäß § 7 Abs. 1 Satz 1 PatG begründen. Auf § 5 PatG wird verwiesen.

Das Institut gewährleistet nicht, daß die Angaben in diesem Bericht frei von Schutzrechten, wie Patent-, Gebrauchsmuster- oder Warenzeichenrechten, sind.

Für die Genauigkeit, Vollständigkeit oder Brauchbarkeit der in diesem Bericht gehaltenen Informationen wird keine Gewähr übernommen. Damit ist auch jede Verantwortung für Schäden ausgeschlossen, die durch eine Benutzung der in dem Bericht enthaltenen Informationen oder der beschriebenen Apparate, Methoden und Verfahren verursacht werden.

Aus patentrechtlichen Gründen ist die Auslage in öffentlichen Bibliotheken sowie die öffentliche Ausleihe untersagt.

For English translation see inside back cover.

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

JAHRESBERICHT 1966

des

Institutes für Plasmaphysik GmbH
München - Garching



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

A 35749

EINLEITUNG

EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 1 (PROF. DR. FÜNFER)

1. <u>Linearer Theta-Pinch</u>	1
1.1 Einleitung	1
1.1.1 Einfluß der Anfangsbedingungen auf Plasmatemperatur und Stabilität	1
1.1.2 Ionen- und Elektronentemperaturen	2
1.1.3 Endverluste und Stabilität	2
1.2 Vorionisierung beim Theta-Pinch	2
1.2.1 Vorionisierung durch hochfrequente Theta-Pinch Entladung	2
1.2.2 Vorionisierung durch z-Pinch Entladung	3
1.3 MJ-Theta-Pinch Experiment ISAR I	4
1.3.1 Vorionisierung	4
1.3.2 Messungen zur Bestimmung der Elektronentemperatur	4
1.3.3 Messungen zur Bestimmung der Ionentemperatur	5
1.3.4 Vorläufiges Limpus-Experiment (M+S) an ISAR I	6
1.4 Theta-Pinch ISAR II	6
1.5 Theta-Pinch ISAR III	7
1.5.1 Vorwärtsstreuexperiment	7
1.5.2 Stabilität und Plasmaeinfluß bei Anwendung von magnetischen Spiegeln	7
1.6 Theta-Pinch ISAR IV	9
1.7 Stoßfreie Kompression und Turbulenzheizung eines Plasmas bei Ausgangsdichten von 10^{11} bis $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	10
1.7.1 Strahlungsvorionisierung	11
1.7.2 Elektrostatischer Teilchenenergie-Analysator	13
1.7.3 Stoßfreie Energiedissipation bei der Kompression eines Plasmas sehr niedriger Dichte	14
2. <u>Toroidaler Theta-Pinch</u>	14
2.1 Einleitung	14
2.2 Toroidaler Theta-Pinch mit überlagertem Hexapolfeld	15
2.3 Toroidaler Theta-Pinch mit rein azimuthalem Magnetfeld	16
3. <u>Theoretische Arbeiten</u>	17
3.1 Anomale Reibung	17
3.2 Dreiflüssigkeitsmodell	17
3.3 Plasmarotation	17
3.4 Vakuumfelder in Theta-Pinch Spulen	18
3.5 Neutronendiagnostik	18
3.6 Messungen von Magnetfeldern mit Hilfe der Streuung von Laserlicht	18
3.7 Endverluste am Theta-Pinch	18

	Seite
4. <u>Spezielle Untersuchungen und Meßmethoden an heißen Plasmen</u>	19
4.1 Streuung von Laserlicht an Plasmen	19
4.1.1 Vorwärtsstreuexperimente	19
4.1.2 90°-Streuexperiment an ISAR I	19
4.1.3 90°-Streuung an einem 7,5 kJ Theta-Pinch zur Untersuchung der Ionen- und Satellitenlinien	19
4.1.4 Verbesserung des Detektorsystems für die 90°-Streuung	20
4.2 Messung von Magnetfeldern mit Hilfe des Faraday-Effekts	20
4.3 Absolute Strahlungsmessungen im Vakuum-UV	21
4.4 Absolute Strahldichtemessungen im Vakuum-UV-Bereich	21
4.5 Untersuchung über die Infrarotemission eines Plasmas	21
4.6 Entwicklung von piezoelektrischen Drucksonden	21
4.7 Weiterentwicklung einer gepulsten Neutronenquelle	21
4.8 Elektronische und optische Entwicklungen	22

EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 2 (DR. G. VON GIERKE)

1. <u>Toroidale Einschließung - WENDELSTEIN</u>	23
1.1 Übersicht	23
1.2 Wendelstein W Ib (Stellarator mit helischen Windungen vom Typ $\ell = 2$)	23
1.3 W II (kreisförmiger Stellarator)	25
1.4 W III (lineare Q-Maschine)	25
1.5 W IV (lineare Maschine)	25
1.6 W V (Oktopol)	26
1.7 Neue Feldkonfigurationen	26
1.8 Theorie	26
1.8.1 Teilchenbahnen im Quadrupolfeld	26
1.8.2 Nullpunktinstabilität im Quadrupolfeld	26
1.9 W VI (supraleitender levitierter Quadrupol)	27
1.10 Versorgungseinrichtungen	27
1.11 Diagnostik	27
1.12 Technik	27
2. <u>Thermische Plasmen</u>	28
2.1 Untersuchungen an Kontaktionsplasmen	28
2.1.1 Geheizte Sonden	28
2.1.2 Q-Maschine in "single-ended operation"	28
2.1.3 Ionenkühlung	29
2.1.4 Vergleich der Dichtemessungen mit Langmuir-Sonden, Resonanzfluoreszenzstreuung und Mikrowellen an "BARBARA"	29
2.1.5 Versuche zu verschiedenen Problemstellungen	29
2.1.6 ELSA-Cäsiumdiode, Elektronenstrahlsonde	29
2.1.7 Ionenstrahlsonde	29
2.1.8 Rechnungen zum Plasmazustand in Q-Maschinen	30
2.1.9 Zwei-Farben-Pyrometer	30
2.2 Plasmawellen und Plasmaausstrahlung	30
2.2.1 Messungen zur Mikrowellenstrahlung aus dem Cs-Plasma einer Q-Maschine	30

	Seite
2.2.2 Messungen zur Mikrowellenausstrahlung eines Elektronenstrahl-Plasmas	30
2.2.3 Untersuchung elektrostatischer Elektronenwellen im Plasma	31
2.3 Untersuchung einer elektrostatisch eingeschnürten Hg-Niederdruckentladung mit Langmuir-Sonden	31
2.4 Hochfrequenzresonanzsonde	31
<u>3. Ambipolare Diffusion</u>	32
<u>4. Ionenzyklotronwellen (SELENE I)</u>	32
<u>5. Elektronenzyklotronwellen in einem rotationssymmetrischen Plasma</u>	34
<u>6. Elektronengyroresonanz-Anregung</u>	34
<u>7. Strahlplasma-Wechselwirkung</u>	34
7.1 WW I	34
7.2 WW II	34
7.2.1 Arbeiten am Strahlsystem	34
7.2.2 Strahlplasma-Wechselwirkung	35
7.3 JOJO	36
<u>8. Wandproblem</u>	36
8.1 Oberflächen	36
8.1.1 Festkörperzerstäubung	36
8.1.2 Feldemissionsuntersuchungen	36
8.2 Massenspektrometer	37
8.3 Zweikammermanometer-Bleareffekt	38
8.4 Restgase und Rückströmung in UHV-Systemen mit Öldiffusionspumpen	38

EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 3 (PROF. DR. WIENECKE)

<u>1. Stationäre Aufheizung von Plasmen hoher Dichte</u>	39
1.1 a) Wasserstoffbogen im Magnetfeld	39
1.1 b) Langer Wasserstoffbogen im Magnetfeld	42
1.1 c) Besetzung der Energieniveaus alkali-ähnlicher Ionen	42
1.1 d) Ausströmen eines Lichtbogenplasmas ins Vakuum	43
1.2 Eieruhr	44
<u>2. Lasererzeugte Plasmen</u>	46
<u>3. Stoßwellenexperimente und Probleme nichtstationärer MHD-Konversion, Plasmaeinschuß</u>	47
3.1 Wechselwirkung zwischen Membranrohrstoßwellen und Magnetfeldern	47
3.1 a) Strommessungen in kreiszylindrischen Meßkammern	47

	Seite
3.1 b) Experimente mit Kanälen rechteckigen Querschnitts	50
3.1 c) Mikrowellendiagnostik	50
3.2 Plasmaeinschuß	50
3.2 a) Technische Probleme	51
3.2 b) Erste Messungen	51
3.2 c) Supraleitende Spulen	51
4. <u>Magnetoplasmadynamik</u>	52
4.1 Segmentierter MHD-Generator mit Gaskreislauf	52
4.2 Messung der Elektronentemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit in einem Argon-Kalium-Plasma bei gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern	52
4.3 Instabilitäten in MHD-Generatoren	53
4.4 Messung von elektrischer Leitfähigkeit und Elektronentemperaturen in einem Argon-Kalium-Plasma bei verschiedenen Gastemperaturen (ohne Quermagnetfeld)	53
4.5 Analytische Untersuchungen der inneren Charakteristiken von MHD-Generatoren	55
4.6 Experimentelle Bestimmung der Stromdichteverteilung in einem simulierten MHD-Generator	56
4.7 Entladungen in Edelgasen ohne Alkali-Zusatz	56
5. <u>Mikrowellen</u>	56
5.1 Ausbreitung elektroakustischer Wellen	56
5.2 Streuung von Mikrowellensignalen	57
5.3 Homogenes Cäsium-Plasma zur Untersuchung longitudinaler Wellen unter definierten Randbedingungen	57
5.4 Strahlungsmessung mit abgestimmten Mikrowellen-Empfangssonden	57
5.5 Messungen an einem strahlerregten Plasma	58
5.6 PIG III	58
5.7 Glimmentladung mit verschiebbaren Elektroden	59
5.8 Wechselwirkung zwischen stehenden transversalen elektromagnetischen Wellen und Plasma in einem Fabry-Perot-Resonator im Frequenzbereich von 35 bis 37 GHz (8 mm).	60
5.9 Anwendung der Mikrowellentechnik auf physikalisch-chemische und biologische Fragen	61

THEORIE (PROF. DR. SCHLÜTER)

1. <u>Gleichgewicht zwischen Plasma und Magnetfeld</u>	62
1.1 Symmetrische magnetohydrostatische Gleichgewichte	62
1.2 Toroidales Gleichgewicht bei kleinem β	62
1.3 Toroidale Felder mit negativem V''	62
1.4 Geometrie von Feldlinien in magnetischen Flächen	63
1.5 Zum q-Problem	63
1.6 Stationäre Gleichgewichte mit Dissipation	64
1.7 Temperaturprofil einer toroidalen Entladung	64
2. <u>Stabilität</u>	65
2.1 Toroidales Gleichgewicht und Stabilität bei $\beta = 1$	65
2.2 Qualitative stabilisierende und destabilisierende Effekte in der makroskopischen Theorie	65
2.3 LIMPUS-Konfiguration	65

	Seite
2.4 Nullpunktinstabilität im Quadrupolfeld	66
2.5 Minimum-B-resistente driftwellenartige niederfrequente Verlustkegelinstabilitäten	66
<u>3. Plasmadynamik</u>	67
3.1 Numerische Rechnungen zum Thetapinch	67
3.2 Numerische Plasmadynamik	67
3.3 Liner-Problem	68
<u>4. Wellen und Strahlung</u>	68
4.1 Pulsstimulierte Strahlung	68
4.2 Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit Plasmen	68
4.3 Wechselwirkung von Laserlicht mit Plasmen	69
4.4 Relativistische nichtlineare Wechselwirkung kalter Plasmen mit elektromagnetischen Wellen	69
4.5 Ausstrahlung bei Harmonischen der Gyrofrequenz	70
<u>5. Mikroskopische Theorie</u>	71
5.1 Adiabatische Invarianten	71
5.2 Schwach instabile elektrostatische Wellen	71
5.3 Leitfähigkeit eines teilweise ionisierten Plasmas	71
<u>6. Angewandte Mathematik</u>	71
6.1 Numerische Berechnung von Magnetfeldern	71
6.2 Numerische Analysis	72
6.3 Ausbildung von Programmierern	73
6.4 Rechenanlage	73

ABTEILUNG TECHNIK (DIPL.-ING. K.H. SCHMITTER)

<u>1. Projektierung</u>	75
<u>2. Konstruktion</u>	79
<u>3. Hochspannungstechnik</u>	83
3.1 Arbeiten für ISAR I	83
3.2 500 kJ-Anlage	84
3.3 Batterie zur Turbulenzaufheizung	86
3.4 14 kV-Triggergerät	86
3.5 Crowbar-Anlage für 80 kJ-Batterie Abt. 1	87
3.6 Weitere Arbeiten	88
<u>4. Elektronik</u>	88
4.1 Netzgeräte	88
4.1.1 Hochstabilisiertes Hochspannungs-Netzgerät	88
4.1.2 Stromstabilisator	89
4.1.3 Stromkonstanthalter 0...6 A	89
4.1.4 Stabilisierung von Gleichstrommaschinen	89

	Seite
4.2 Meßgeräte - Meßverstärker	89
4.2.1 Elektrolytischer Trog	89
4.2.2 Analog-Multiplizierschaltung	89
4.2.3 Variables Mehrkanalfilter	89
4.2.4 Gleichspannungsverstärker für elektrostatische Teilchenaufhängung	90
4.3 Impulstechnik	90
4.3.1 Impulsverzögerungsgerät 0,5 μ s ... 10 ms	90
4.3.2 Licht-Triggereinrichtung zur Entkopplung von Triggersignalen	90
4.3.3 Stromimpulsgenerator	90
4.4 Überwachungsgeräte - Steuergeräte	90
4.4.1 Überwachungsgerät für das 110 kV-Netz	90
4.4.2 Schneller Hochspannungsschalter 100 kV 1 A	90
4.4.3 Ladespannungswächter (Ersatz für Meßcontacter)	91
4.5 Bildwandler	91
4.5.1 7-Bildeinschub	91
4.5.2 Langsamer Sweep-Einschub	91
4.5.3 Prototyp neuer Bildwandler	91
4.5.4 Licht-Triggereinrichtung für Bildwandler	92
4.5.5 Weiterentwicklung	92
4.6 Rubin-Laser	92
4.6.1 Doppelpulsmethode für passiven Q-Switch-Betrieb	92
4.6.2 Zweistufiger Hochleistungslaser	92
4.7 Sonstige diagnostische Geräte	92
4.7.1 Ortungsverfahren der Normalübergänge an supraleitenden Spulen	92
4.8 HF-Generatoren	92
4.8.1 1,5 MW-Impulssender	92
4.8.2 100 W-Generator	93
4.9 Ausstellungsobjekt "ISAR I"	93
4.10 Konstruktive und optische Arbeiten	93
4.11 Service	93
5. <u>Magnetfeldtechnik</u>	93
5.1 Supraleitende Magnetfelder	93
5.1.1 Untersuchungen an einzelnen Supraleitern	93
5.1.2 Stabilisierte Supraleiter	94
5.1.3 Supraleitende Spulen und impulsförmige Magnetfelder	94
5.1.4 Anwendung in der Plasmaphysik	94
5.2 Wassergekühlte Spulen für stationäre und kurzzeitige Magnetfelder	94
5.2.1 Serienmäßige Magnetfeldspulen	94
5.2.2 Stabaufhängung für Oktopol-Torus	95
5.2.3 Helische Windungen für Torus W II	95
5.2.4 Wassergekühlte Spulen für hohe Magnetfelder	95
5.3 Impulsförmige Magnetfelder	95
5.3.1 Versuche an niederwindigen Impulsspulen	95
5.3.2 Eieruhr-Magnetfeld	96
5.4 Magnetfeldberechnung	96
5.5 Magnetfeld-Meßtechnik	96
6. <u>Vakuumtechnik / Technologie</u>	96
6.1 Vakuumapparatur für SELENE I	97
6.2 Einrichtung zum Innenbedampfen eines Entladungsrohres	97

	Seite
6.3 Ausheizbare, unmagnetische Metall-Keramik-Verbindungen	97
6.4 Verfahren zur Herstellung von Druckfunkenstrecken-Gehäusen aus Gießharz	97
6.5 Untersuchung von rostfreien Stählen	98
6.6 Schweißverbindung Molybdän - 18/9 Stahl	98
6.7 Allgemeine Materialuntersuchungen	99
6.8 Sonstige Arbeiten	99
6.9 Glastechnische Arbeiten	100
7. <u>Installationstechnik</u>	100
7.1 Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von Geräten	100
7.2 Inbetriebnahmen	100
7.3 Projektierte Anlagen	100
8. <u>Chemie</u>	101
8.1 Fertigungsaufträge	101
8.2 Elektropolierverfahren	101
8.3 Betonklotz für die Kollektorverlängerung	101
8.4 Beschaltungskondensator	101
8.5 Galvanotechnik der Edelmetalle	102
8.6 Stabilisierung von Supraleitern durch Cu-Ummantelung	102
8.7 Bautenschutz	102
8.8 Galvanikeinrichtung	102
9. <u>Zentralwerkstätten</u>	103
9.1 Mechanische Werkstätten und Schreinerei	103
9.2 Zentrale Elektrowerkstatt	104
9.3 Zentrale Elektronikwerkstatt	105
<u>GESCHÄFTSFÜHRUNG UND VERWALTUNG</u>	
1. <u>Personelle Entwicklung</u>	107
2. <u>Baumaßnahmen</u>	107
3. <u>Organisatorische und finanzielle Entwicklung</u>	113
<u>Veröffentlichungen</u>	115
<u>Laborberichte</u>	120

EINLEITUNG

Bei genügend hohen Temperaturen wird jede Materie zu einem Plasma, d.h. zu einem Gas aus elektrisch geladenen Teilchen. Dieser Plasmazustand ist früher relativ wenig untersucht worden, obwohl schon seit langem bekannt ist, daß er als der Normalzustand der Materie im Kosmos angesehen werden muß. Das Institut für Plasmaphysik hat die Aufgabe, ihn im Hinblick auf die mögliche Anwendung zur kontrollierten Energieerzeugung aus thermonuklearen Fusionsreaktionen, und in geringerem Umfange im Hinblick auf die Möglichkeit der magnetohydrodynamischen Energiewandlung zu untersuchen. Einer möglichen technischen Verwertung, die von großer wirtschaftlicher Bedeutung sein kann, stehen besonders bei dem Fusionsproblem noch zahlreiche ungelöste physikalische Fragen im Wege. Daher müssen die Untersuchungen experimentell und theoretisch mit den Methoden der Grundlagenforschung durchgeführt werden, um zu lernen, wie man die außerordentlich komplizierten Eigenschaften eines Plasmas genügend beherrschen kann.

Das wissenschaftliche Programm des Institutes und die Überwachung seiner Durchführung sind die Aufgaben der Wissenschaftlichen Leitung des Institutes, eines kollegialen Organs, das zur Zeit aus den Herren E. Fünfer, G. von Gierke, K.H. Schmitter, A. Schlüter (Vorsitzender) und R. Wienecke als aktiven Mitgliedern besteht. Die GmbH hatte zu Geschäftsführern die Herren E. Telschow und G. Lehr. Die Leitung und die Verwaltung des Institutes folgen den Grundsätzen der Max-Planck-Gesellschaft, die das Institut im Jahre 1960 gegründet hatte. Auch in dem Berichtsjahr bestand zwischen dem Institut und EURATOM ein Assoziationsvertrag, nach dem das Personal des Institutes und die in ihm tätigen EURATOM-Bediensteten eine gemeinsame Forschungsgruppe bildeten, und der insbesondere durch die Institution der Groupe de Liaison eine Abstimmung der Arbeiten zwischen den verschiedenen EURATOM-Assoziationen auf dem Gebiete der Plasmaphysik ermöglicht. Die wissenschaftlichen Arbeiten des Institutes werden in drei experimentellen Abteilungen und den Abteilungen Theorie und Technik durchgeführt. Dabei sind an der Planung, dem Aufbau und der Durchführung größerer Experimente in der Regel Angehörige mehrerer Abteilungen beteiligt. Angesichts der Lage auf dem Gebiete der Fusionsforschung, bei der nicht klar ist, auf welchem Wege das Ziel der Einschließung eines heißen Plasmas für relativ lange Zeiten erreicht werden kann, werden verschiedene Wege gleichzeitig untersucht, so daß sich in den einzelnen Abteilungen sachlich begründete verschiedene Schwerpunkte ergeben.

In der Experimentellen Abteilung 1 (Leitung Prof. E. Fünfer) lag der Schwerpunkt auf dem Gebiet schneller Entladungen mit hohen Temperaturen und hohen Dichten. Daraus ergab sich die bevorzugte Benutzung von sog. Theta-Pinch-Anordnungen. In der größten dieser Anordnungen (ISAR I) wurden beim Betrieb mit voller Leistung Temperaturen oberhalb von 5 keV erreicht. Außerdem wurden erste Versuche zum Einfluß komplizierterer Geometrien auf das dynamische Verhalten und auf die Stabilität des Plasmas durchgeführt. Ein Experiment zur stoßfreien Kompression und Turbulenzheizung wurde bis Ende des Jahres aufgebaut und dann in Betrieb genommen. Eine Gruppe führte die bereits im MPI begonnenen Arbeiten an einem toroidalen Theta-Pinch mit überlagertem Hexapolfeld (SPINNE) weiter, wobei vor allem die Teilchenverluste bei höheren Energien als bisher untersucht werden sollten. Verschiedene Meßverfahren am Theta-Pinch Plasma, wie z.B. die Neutronendiagnostik, Teilchenenergieanalyse, Magnetfeldmessung mittels Faradayeffekt wurden weiter entwickelt. Besonderer Wert wurde auf die Verbesserung der Streulichtmethode gelegt. Es gelang erstmalig, die Ionen- und Satellitenlinien an einem (relativ kalten) Theta-Pinch Plasma bei 90° -Streuung zu vermessen. Bei einem Vorwärtsstreuexperiment an einem heißen ($T_1 \approx 100$ eV) Plasma wurde ebenfalls eine spektrale Auflösung der Ionenlinie erreicht und es konnten direkte Aussagen über die Ionen-temperatur gemacht werden.

In der Abteilung Experimentelle Plasmaphysik 2 (Leitung Dr. G. von Gierke) standen weiterhin die Arbeiten über die Einschließung von Plasmen mit geringerem Druck in toroidalen Anordnungen im Mittelpunkt des Interesses. Dabei wurden die Teilchenverlustraten eines stationären, durch Kontaktionisation erzeugten Cäsiumplasmas in einer Anlage vom Typ Stellarator sowie in einer toroidalen Oktopolanordnung, gebildet aus vier ringförmigen Innenleitern, untersucht. Es gelang, die durch Oberflächenrekombination außerhalb des Bereiches der Plasmaquelle hervorgerufenen Verluste so zu reduzieren, daß der Plasmatransport quer zum Magnetfeld genau untersucht werden konnte. Er erwies sich - wie schon früher vermutet - unter bestimmten Voraussetzungen an die Temperatur der Plasmaquelle und an ihre Stellung im Magnetfeld als wesentlich kleiner als man bei Anwesenheit von sog. "pump-out"-Verlusten erwarten würde. Diese Experimente wurden Mitte 1966 wegen des Umzugs der Arbeitsgruppe vom Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik in München in das Institut für Plasmaphysik unterbrochen. Verlässliche Aussagen über den Plasmatransport quer zum Magnetfeld erfordern eine möglichst weitgehende Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung entlang und quer zum Magnetfeld und insbesondere der Methoden der Dichtemessungen. Diese Fragen wurden in gleichen Plasmen, aber in linearen Anordnungen, den sogenannten Q-Maschinen untersucht.

Die Abstrahlung von Mikrowellen bei Harmonischen der ganzen und halben Elektronen-gyrofrequenz, die der Einschluß eines Elektronenstrahls in ein Plasma verursacht, wurde weiter untersucht. Die Experimente über die Wechselwirkung eines Plasmas mit einem hochenergetischen Ionenstrahl konnten nach umfangreichen technischen Vorbereitungen begonnen werden, ebenso liegen erste Ergebnisse über das Verhalten unter dem Einfluß zweier entgegenlaufender Ionenstrahlen vor.

Die Arbeiten der Gruppe "WANDPROBLEME" wurden weitergeführt, insbesondere das Verhalten von Festkörperoberflächen unter Ionenbeschuß mit verschiedenen Meßmethoden untersucht. In Anbetracht des entscheidenden Einflusses, welchen die aus der Wand losgelösten Verunreinigungen für einen möglichen Fusionsreaktor besitzen, wurde beschlossen, die Untersuchungen auf diesem Gebiet zu intensivieren.

In der Experimentellen Abteilung 3 (Leitung Prof. R. Wienecke) wurden die Untersuchungen eines quasi-stationären Plasmas hoher Dichte in einem starken axialen Magnetfeld fortgesetzt. Da die axiale Wärmeleitung, die nicht durch ein Magnetfeld behindert ist, entscheidend geworden ist, wurde die Länge der Entladung erheblich vergrößert. Der bereits früher gefundene aber nicht erklärte Druckanstieg zur Achse innerhalb des vollionisierten Gebietes konnte an der "EIERUHR" quantitativ durch den aus der Festkörperphysik bekannten Nernst-Effekt erklärt werden, dessen Wichtigkeit bisher nicht beachtet worden war.

Die Experimente zur Wechselwirkung von Stoßwellen mit stationären Magnetfeldern konnten mit Erfolg fortgesetzt werden. Es gelang, eine Meßanordnung zu entwickeln, mit deren Hilfe erste quantitative Messungen der durch Stoßwellen induzierten Ströme möglich waren.

Bei der Untersuchung von "Edelgas-Alkali MHD-Generatoren" wurde die elektrische Leitfähigkeit parallel und senkrecht zu einem Magnetfeld gemessen und mit berechneten Werten verglichen, wobei sich gute Übereinstimmungen ergaben. Die gemessene Stromverteilung im Generator ergab deutliche Abweichungen von unter vereinfachten Annahmen berechneten Werten. Die theoretischen Verfahren konnten verbessert werden. In neu geplanten Experimenten sollen die im MHD-Kanal aufgetretenen Instabilitäten untersucht werden.

In den Mikrowellenuntersuchungen konnte die Ausbreitung elektroakustischer Wellen in der Säule einer Argon-Niederdruck-Glimmentladung geklärt werden. An einem strahlerregten Plasma wurde die Emission ganz- und halbzahligen Harmonischen der Elektronen-gyrofrequenz beobachtet.

Ein großer Teil der Arbeiten der Abteilung Theorie (Leitung Prof. A. Schlüter) erfolgte wie in den Vorjahren in enger Zusammenarbeit mit Mitgliedern der anderen Abteilungen. In besonderem Umfange galt dies für die Untersuchungen zum Gleichgewicht und zur Stabilität in toroidalen Konfigurationen besonders vom Typ des Stellarators. Im Hinblick auf die bestehenden Unterschiede in den experimentellen Ergebnissen über den Einschluß von Plasmen in verschiedenen Stellaratoren wurden der Fall vernachlässigbarer Rückwirkung des Plasmas mit numerischen und analytischen Methoden ausführlich untersucht und führte auf unerwartete Schwierigkeiten, die noch nicht vollständig überwunden werden konnten. Zugleich ergaben sich unerwartet günstige Aussagen über die magnetohydrodynamische Stabilität solcher Konfigurationen. Der Einfluß dissipativer Prozesse auf stationäre Gleichgewichte wurde in mehreren Arbeiten behandelt. Zu einem direkten Vergleich mit experimentellen Ergebnissen diente auch die Fortsetzung der numerischen Berechnungen von dynamischen Vorgängen in schnell komprimierten Plasmen, die in der Geometrie eines idealisierten Theta-Pinches fortgesetzt und mit neuen Verfahren auf kompliziertere Geometrien ausgedehnt wurden. Wesentlich über die Möglichkeiten einer flüssigkeitsähnlichen Beschreibung des Plasmas führten die Untersuchungen über die sog. Mikroinstabilitäten und über die Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischen Wellen verschiedener Frequenzen und dem Plasma.

Zur Erhöhung der Kapazität der Rechenanlage wurde zusätzlich zu der IBM 7090 in der Mitte des Berichtsjahres eine IBM 360-30 installiert. Zur direkten Kopplung beider Maschinen mußten eigene Komponenten entwickelt und hergestellt werden. Der gesamte Rechenzeitverbrauch stieg im Vergleich zum Vorjahre von 3840 auf 6460 Stunden.

In der Abteilung Technik (Leitung Dipl.-Ing. K.H. Schmitter) war auch 1966 der Umfang der Aufgaben aus dem Bereich der schnellen Entladungsanlagen verhältnismäßig groß. Eine der Ursachen dafür lag in dem Beschluß, gleichzeitig mit der notwendig gewordenen Reparatur des Kollektors bei "ISAR I" auch die Hauptbatterie für Crowbar umzubauen und den Kollektor durch eine Verlängerung zu ergänzen. Dieser außerplanmäßige Einsatz bewirkte Terminverzögerungen bei der Fertigstellung insbesondere der Anlage "ISAR II" und "TURBULENZBATTERIE" und eine Zurückstellung der nicht termingebundenen Arbeiten der Projektierung und der Hochspannungstechnik.

Im Verhältnis dazu war die Magnetfeldtechnik weniger durch die Bearbeitung von Aufträgen für die experimentellen Abteilungen beansprucht; dies kam vor allem dem Gebiete der Supraleitung zugute. Die vielfältigen hier durchgeführten Untersuchungen fanden ihren Niederschlag in einem Projekt für eine große supraleitende Magnetfeldspule. In mehrfacher Beziehung sehr wertvoll erwies sich die Möglichkeit, im Rahmen der Gruppe Technologie spezielle werkstofftechnische Probleme behandeln zu können. Dabei wurden die allgemeine Werkstoffprüfung im Rahmen der Materialbeschaffung für die Läger und für einzelne Aufträge sowie die metallographischen Untersuchungen von Materialverbindungen zunehmend wichtiger. In der Elektronikgruppe wurden wiederum eine große Anzahl von verschiedenartigen Geräten für die Verwendung in den experimentellen Abteilungen entwickelt. Hervorzuheben sind hier die Erfolge mit Hochleistungslasern, die es zukünftig gestatten werden, den Bedarf an solchen Geräten in wirtschaftlicherer Weise zu decken, als es bisher möglich war.

Aus der Vielzahl der Arbeiten der Gruppe Chemie erscheint die Entwicklung eines Verfahrens zur Behandlung der undichten Klinkerfassaden der Institutsbauten erwähnenswert. Alle in Frage kommenden Fassadenteile des Instituts wurden nach diesem Verfahren imprägniert. Der gewünschte Erfolg ist erreicht und bis jetzt erhalten worden. Nach den vorgelegten Angeboten wäre eine Imprägnierung nach bisher bekannten Verfahren um ein mehrfaches teurer gewesen.

Über die mechanischen Zentralwerkstätten liefen Aufträge über insgesamt etwa 97.000 Arbeitsstunden. 80,6 % dieser Fertigungszeit wurde in den Zentralwerkstätten geleistet, 19,4 % gingen an Fremdwerkstätten. Von der Elektro- und Elektronikwerkstatt wurden zusammen 33.000 Arbeitsstunden geleistet. In der Elektrowerkstatt lagen zum Jahresschluß noch unerledigte Aufträge über etwa 3.000 Arbeitsstunden vor. Im Laufe des Jahres wurde mit dem Ausbau der zentralen Galvanikwerkstatt begonnen. Sie wird im Frühjahr 1967 dem Betrieb übergeben werden.

Übersicht

Experimentell und theoretisch lag der Schwerpunkt auf dem Gebiet gepulster Entladungen mit hohen β - Werten. Im Vordergrund standen Untersuchungen am linearen Theta-Pinch. Ein Experiment zur stoßfreien Kompression und Turbulenzheizung wurde bis Ende des Jahres aufgebaut und ist jetzt in Betrieb. Eine Gruppe führte die bereits im MPI begonnenen Arbeiten an einem toroidalen Theta-Pinch mit überlagertem Hexapolfeld (SPINNE) weiter, wobei vor allem die Teilchenverluste bei höheren Energien untersucht werden sollen.

Verschiedene Meßverfahren am Theta-Pinch Plasma, wie z.B. die Neutronendiagnostik, Teilchenenergieanalyse, Magnetfeldmessung mittels Faradayeffekt wurden weiter entwickelt. Besonderer Wert wurde auf die Verbesserung der Streulichtmethode gelegt. Es gelang, die Ionen- und Satellitenlinie an einem (relativ kalten) Theta-Pinch Plasma bei 90° Streuung zu vermessen. Bei einem Vorwärtsstreuexperiment an einem heißen ($T_1 \approx 100$ eV) Plasma wurde ebenfalls eine spektrale Auflösung der Ionenlinie erreicht und es konnten Aussagen über die Ionentemperatur gemacht werden.

1. Linearer Theta-Pinch1.1 Einleitung

Drei Theta-Pinch Experimente, deren Daten stark verschieden sind, ISAR I, ISAR III und ISAR IV (ISAR II ist noch im Aufbau), wurden zur Klärung folgender Fragen eingesetzt:

1.1.1 Einfluß der Anfangsbedingungen auf Plasmatemperatur und Stabilität

Verschiedene Methoden der Vorionisierung wie z.B. der hochfrequente Theta-Pinch, der schnelle z-Pinch und die UV-Strahlungsvorionisierung wurden untersucht. Zur Erzeugung stoßfreier Plasmen und Turbulenzheizung wird speziell bei sehr kleinen Füllichten die UV-Strahlungsvorionisierung vorgesehen. Es wurden intensive UV-Strahler in Form von intensiven Entladungen entwickelt mit denen gegenwärtig Ionisierungsgrade in der Größenordnung 20 % erreicht werden können.

Zwei in kurzem Zeitabstand aufeinanderfolgende stark gedämpfte z-Pinche haben bei etwas höheren Anfangsdichten von $0,5 - 1,0 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ zu einer wesentlichen Verringerung der Verunreinigungen im Plasma geführt. Allerdings haben die Versuche auch gezeigt, daß im Falle von ISAR I gegenüber der früheren Vorionisierung eine Verringerung der erreichbaren Ionenenergien um etwa 20 - 30 % auftritt.

Unklar ist noch immer der Einfluß von Verunreinigungen, die sich an der Wand des Entladungsfäßes befinden und eventuell bei Beginn der Hauptentladung abgelöst werden. Ihre Wirkung auf den Ablauf der Hauptentladung, insbesondere auf ihre Stabilität scheint sehr viel wesentlicher zu sein als Zusätze zum Füllgas, z.B. Zusätze von Sauerstoff zum Deuterium.

Da diese Fragen für die Reproduzierbarkeit stabiler, heißer Plasmen von entscheidender Bedeutung sind, wurden zwei Arbeitsgruppen mit ihrer grundsätzlichen Bearbeitung beauftragt.

Eine Gruppe beschäftigt sich bereits mit Untersuchung der Eigenschaften von Vorionisierungsplasmen und ihres Einflusses auf die Hauptentladung. Dazu gehört auch das sehr schwierige Problem der Vorionisierung bei toroidalen Konfigurationen. Eine zweite Gruppe soll in nächster Zeit die Wandprobleme in Angriff nehmen.

1.1.2 Ionen- und Elektronentemperaturen

Insbesondere bei kleinen Füllichten wurden erhebliche kinetische Iontemperaturen erreicht. Z.B. wurden bei ISAR I mit 2,6 MJ Energie bis zu etwa 6 keV gefunden (dabei wurde eine dreidimensionale Maxwellverteilung angenommen).

Da die Ionen-Stoßzeiten bei etwa $5 - 10 \cdot 10^{-6}$ sec liegen, ist ein stark anisotropes Plasma zu erwarten. Nimmt man deswegen eine zweidimensionale Verteilung an, so liefert die Rechnung entsprechend höhere Iontemperaturen. Eine experimentelle Bestimmung des Anisotropiegrades ist bisher noch nicht gelungen. Auf Grund theoretischer Überlegungen erscheint es jedoch möglich, Aussagen darüber zu gewinnen, indem man die Winkelabhängigkeit des Neutronenflusses und der Neutronenenergie mißt. Dies erscheint auch deswegen sinnvoll, da die Neutronenausbeute an ISAR I sehr hoch ist. Sie erreicht Werte über 10^{10} Neutronen pro Entladung.

Elektronentemperaturen wurden sowohl aus Röntgenabsorptionsmessungen als auch aus inkohärenter (90° -)Streuung von Laserlicht ermittelt. Frühere Röntgenabsorptionsmessungen waren durch Reaktionsprotonen verfälscht worden. Durch geeignete Absorptionsfolien konnte dieser Fehler beseitigt werden. Trotzdem waren die aus Absorptionsmessungen gewonnenen Elektronentemperaturen fast zweimal so hoch wie die Werte aus Streumessungen, bei denen Temperaturen bis zu etwa 500 eV gefunden wurden. Eine Begrenzung der Elektronentemperatur auf diesen niedrigen Wert ist nach Überlegungen von Green u.a. infolge des Energieverlustes der Elektronen durch Wärmeleitung zu erwarten.

1.1.3 Endverluste und Stabilität

Bei einem Theta-Pinch Plasma mit starker Anisotropie der Ionen ist eine merkliche Reduzierung der Endverluste zu erwarten. Dies trat deutlich bei der kurzen Spule von 14 cm Länge an ISAR IV in Erscheinung.

An ISAR III wurden magnetische Spiegel mit Verhältnissen bis zu 1 : 2,4 untersucht. Eine deutliche Verlängerung der Einschlußzeit wurde beobachtet. Bei kleinen Anfangsdichten war das Plasma auch bei den größten Spiegelverhältnissen nicht merklich instabil. Ein zweidimensionales Programm wurde aufgestellt und soll einen Vergleich mit den Endverlustmessungen an ISAR III bei verschiedenen Spiegelverhältnissen ermöglichen.

1.2 Vorionisierung beim Theta-Pinch

1.2.1 Vorionisierung durch hochfrequente Theta-Pinch Entladung

(G. Decker, D. Düchs, H. Herold)

Die Untersuchungen zur Plasmadynamik bei hochfrequenten Theta-Pinch Entladungen wurden Mitte des Jahres abgeschlossen. Auf der "1st European Conference on Nuclear Fusion and Plasma Physics", München 1966, wurde zusammenfassend darüber berichtet [12]. Die Übereinstimmung des experimentell bestimmten Magnetfeldverlaufs im Plasma mit den Rechnungen nach dem magneto-

hydrodynamischen Dreiflüssigkeitsmodell war bisher mangelhaft. Das Rechenprogramm wurde verbessert und eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie erreicht.

1.2.2 Vorionisierung durch z-Pinch Entladung

(A. Eberhagen, W. Köppendörfer)

Bei den durchgeführten Theta-Pinch Experimenten, insbesondere an den Anlagen ISAR I und ISAR IV, liegen Anhaltspunkte dafür vor, daß bei niederen Fülldrücken ($5 - 20 \cdot 10^{-3}$ Torr) durch die verwendeten z-Pinch-Vorentladungen ein nahezu vollständig ionisiertes Deuteriumplasma nicht erreicht werden konnte. Auch wurde keine reproduzierbare Zündung der Vorentladung, unabhängig von der nachfolgenden Hauptentladung festgestellt. Daraus ergab sich die Dringlichkeit für detailliertere Untersuchungen der Plasmaverhältnisse in den Vorionisierungsentladungen mit dem besonderen Ziel, Möglichkeiten für eine Verbesserung von Zündung und erreichbarem Ionisierungsgrad aufzuzeigen.

Zu diesem Zweck wurde eine gesonderte Vorionisierungsanlage aufgebaut. Ihre Batteriedaten und die Dimension des Entladungsgefäßes wurden im Hinblick auf eine spätere Anwendung den Werten bei ISAR I angepaßt. So besitzt das Entladungsgefäß eine Länge von 300 cm und einen äußeren Durchmesser von 10 cm. Als Batterieeinheiten wurden für die z-Pinch-Entladungen zwei Marx-Generatoren (80 kV, zweistufig, $0,1 - 0,2 \mu\text{F}$ je Stufe; bzw. 120 kV dreistufig, $0,1 - 0,2 \mu\text{F}$ je Stufe) eingesetzt, die in einem wählbaren zeitlichen Abstand nacheinander durch das Gefäß entladen werden. In beiden Entladungskreisen ist durch den wahlweisen Einbau von spannungsabhängigen Widerständen (Thyrite) die Möglichkeit gegeben, den Entladungsstrom durch Ausdämpfen im wesentlichen bis auf jeweils einen Stromimpuls zu beschränken.

Zusätzlich zu diesen beiden Vorentladungen erfolgt über das Gefäß zu einem ebenfalls wählbaren Zeitpunkt die Entladung einer kleinen Theta-Pinch Batterie ($U_0 = 25$ kV, $3 \mu\text{F}$, $T/4 = 0,4 \mu\text{sec}$). Die Bestimmung der Plasmaparameter nach Zünden dieses Theta-Pinches soll dann Auskunft darüber geben, welche Vorentladungsbedingungen für eine nachfolgende Theta-Pinch-Entladung optimal sind. Um eine Übertragbarkeit dieser Informationen auf die Verhältnisse in den Anfangsphasen der ISAR I und ISAR II Theta-Pinch-Entladungen zu ermöglichen, wurde der Magnetfeldanstieg vergleichbar gemacht ($\dot{B} = 1,6 \times 10^{10}$ G/sec).

Nach Abschluß des Aufbaus dieser Vorionisierungsanlage wurden zunächst vorläufige Untersuchungen angestellt mit dem Ziel, einen Überblick über das Zündverhalten der Vorentladungen im niederen Fülldruckbereich zu gewinnen. Die Ergebnisse zeigten erwartungsgemäß im Fülldruckbereich oberhalb $2 \cdot 10^{-2}$ Torr D_2 Zündverzögerungen für die Vorentladung von kleiner als $1 \mu\text{sec}$, darunter jedoch eine sehr starke Zunahme mit abnehmendem Ausgangsdruck (10^{-2} Torr D_2 : $3 - 5 \mu\text{sec}$, $5 \cdot 10^{-3}$ Torr D_2 : $20 - 50 \mu\text{sec}$). Die Frage, wie weit sich diese Zündverzögerungen durch geeignete Maßnahmen (z.B. zusätzliche Hochfrequenzentladung, Ausnutzung einer Spitzenfeldemission als Zündhilfe) reduzieren lassen, konnte noch nicht endgültig geklärt werden. Ebenfalls bleibt noch offen, wie Veränderungen der Verhältnisse an den Gefäßwandoberflächen durch eine vorangegangene energiereiche Entladung (wie es z.B. bei ISAR I und ISAR II der Fall ist) auf den Zündverzug der Vorentladung einwirken.

Weiterhin ist mit der Ermittlung von optimalen Vorentladungsbedingungen im oben genannten Sinne begonnen worden. An das Erreichen dieses Zieles wird sich dann die Bestimmung der Plasmaparameter in den betreffenden Vorentladungen selbst anschließen. Die entsprechende Diagnostik besteht aus der Messung des zeitlichen Verhaltens der diamagnetischen Signale, der Intensität von Kontinuum, Wasserstofflinien und Verunreinigungslinien (Kohlenstoff), der Wasserstofflinienprofile und in Smearbildaufnahmen.

1.3 MJ-Theta-Pinch Experiment ISAR I

(C. Andelfinger, G. Decker, E. Fünfer, A. Heiss, H. Hermannsbrfer, M. Keilhacker, H. Röhr, U. Seidel, J. Schmer, M. Ulrich, G. Wolf)

Im Berichtsjahr wurden die Experimente bis zur vollen Batterieenergie von 2,66 MJ ausgedehnt. Hierbei wurden Änderungen an der Vorionisierungsentladung notwendig, um reproduzierbare Verhältnisse zu bekommen. Zunächst wurden Messungen zur Bestimmung der Elektronentemperatur mit der Röntgenabsorptionsmethode und mit Laserstreuversuchen fortgesetzt. Bei Energien über 1,5 MJ wurden die Dichtemessungen problematisch, so daß die Bestimmung der Ionentemperatur über den Wirkungsquerschnitt der DD-Reaktionen unsicher wird. Die Maximalwerte dürften bei ca. 6 keV liegen (unter der Annahme einer dreidimensionalen Maxwellverteilung).

Kurzzeitig wurde eine Versuchsserie mit einer gestuften Theta-Pinch Spule durchgeführt, um in Annäherung an eine Limpuskonfiguration (M+S) die Stabilität des Plasmas zu betrachten. Die Versuche mit ISAR I mußten Ende Juli 1966 abgebrochen werden, da im Leitbelag des Hauptkollektors der sog. Sägeeffekt auftrat und eine Abänderung notwendig machte. Diese Pause wurde gleichzeitig dazu verwendet, eine Kollektorverlängerung zur Verringerung der Plasmadrift und passive Crowbarschalter zur Vermeidung durchschwingender Entladungen einzubauen.

1.3.1 Vorionisierung

Die Vorionisierung erfolgt durch einen z-Pinch mit Hilfe eines 120 kV, 240 Joule Marx-Generators. Der damit erzielte Stromimpuls von 1 μ sec Dauer war nur reproduzierbar, wenn der Entladung eine Glimmentladung vorhergegangen war. Beim Übergang zu höheren Theta-Pinch Energien veränderte sich die Beschaffenheit der inneren Gefäßoberfläche so, daß bei 10^{-2} Torr D_2 keine Zündung der z-Entladung mehr erreicht wurde. Z.B. sank nach Entladungen mit Energien von ≥ 2 MJ der Restgasdruck im Gefäß von 10^{-7} auf 10^{-9} Torr. Dies läßt sich durch eine Getterwirkung der inneren Gefäßoberfläche erklären.

Anstelle der ersten Glimmentladung wurde dann eine Impulsentladung verwendet, zunächst mit einem Impulskreis von 40 kV und 80 Joule, endgültig dann mit einem 2-stufigen Marx-Generator von 80 kV und 160 Joule. Damit wurde dann die eigentliche Vorentladung (120 kV, 240 Joule) wieder reproduzierbar.

Bei dieser Umstellung auf eine 2-stufige Vorentladung hat sich der Sauerstoffgehalt nicht merklich erhöht, dagegen stieg die Intensität der Röntgenstrahlung aus der Vorionisierung beträchtlich an.

1.3.2 Messungen zur Bestimmung der Elektronentemperatur

Es zeigte sich, daß frühere Messungen nach der Röntgenabsorptionsmethode durch Reaktionsprotonen aus den DD-Prozessen verfälscht waren. Je nach der Absorberkombination wurde eine zu hohe oder zu niedrige Temperatur bestimmt. Dieser Fehler wurde durch eine hinreichend dicke Beryllium-Folie ($21,7 \text{ mg/cm}^2$) beseitigt (Reichweite von 3 MeV Protonen = $17,7 \text{ mg/cm}^2 B_e$). Die so ermittelten Elektronentemperaturen liegen bei den meisten Entladungen im Zeitintervall 3 - 8 μ sec bei 500 - 700 eV. Vereinzelt treten Werte bis ca. 1000 eV auf. Diese Temperaturen zeigten im untersuchten Bereich von 1,5 - 2,6 MJ keine Energieabhängigkeit. Zu sehr frühen Zeiten, ungefähr 0,9 μ sec nach Beginn der Hauptentladung tritt eine relativ harte Komponente der Röntgenstrahlung auf, die im Mittel ca. 1500 eV entsprechen würde.

Gleichzeitig wurden 90° -Laserstreuexperimente durchgeführt. Die daraus ermittelten Elektronentemperaturen sind um einen Faktor 1,5 - 2 niedriger als die aus der Röntgenabsorptionsmethode gewonnenen Werte. Hier ergab sich eine Erhöhung von T_e mit der Batterieenergie. Diese Widersprüche sollen durch Verbesserung der Meßtechnik geklärt werden. Einerseits wird eine erhöhte Meßgenauigkeit der Streumessungen durch Erhöhung der Streustrahlung und durch eine genauere Relativeichung der Meßkanäle angestrebt. Andererseits wird der Röntgendetektor so abgeblendet, daß er nicht mehr die Gefäßwand sieht. Dies war bisher wegen der Plasmadrift bis in Wandnähe nicht möglich, sollte aber nach dem Einbau der Kollektorverlängerung möglich werden. Damit soll Röntgenstrahlung von energiereichen Teilchen, die auf die Gefäßwand auftreffen, ausgeschlossen werden.

1.3.3 Messungen zur Bestimmung der Iontemperatur

Die Iontemperatur wurde über den Wirkungsquerschnitt der DD-Reaktion bestimmt. Hierfür ist die Messung des Neutronenflusses und der Plasmadichte nötig.

Der Neutronenfluß wurde mit Szintillationszählern zeitlich aufgelöst gemessen. Die Eichung erfolgte über die Gesamtneutronenausbeute, gemessen mit einem Silberzähler. Dabei stieg die Neutronenausbeute in der 1. Halbwelle der Entladung bei einer Änderung der Batterieenergie von 1 bis 2,6 MJ von ca. 10^9 auf ca. 10^{10} an. Mit steigender Energie wird dabei die Neutronenausbeute in der 2. Halbwelle kleiner.

Die Plasmadichte wurde im Energiebereich bis zu 1,5 MJ mit einem Differentialinterferometer axial und gleichzeitig radial aus der Kontinuumstrahlung bestimmt. Beide Verfahren lieferten übereinstimmende Ergebnisse mit maximalen Dichten auf der Plasmaachse von $3 - 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Bei Entladungen mit Energien größer als 1,5 MJ wurden die Ergebnisse sehr ungenau. Die Gründe hierfür sind:

Beim interferometrischen Verfahren störte die starke Bedampfung der Gefäßabschlußplatten. Diese Erscheinung soll durch die Crowbarschaltung behoben werden, weil dann das Gefäß durch stark verunreinigte spätere Halbwellen nicht mehr belastet wird. Um die mit Fehlern behaftete Integration bei der Auswertung der Differentialinterferometermessungen zu vermeiden, sollen die künftigen Messungen mit einem Mach-Zehnder-Interferometer durchgeführt werden. Zu diesem Zweck hat Zeiss ein bisher verwendetes Interferometer mit 0,9 m lichter Weite auf unsere Anregung hin aufgeschnitten und auf 3,8 m verlängert. Dabei bleibt die Stabilität so gut erhalten, daß man bei eingestellten Interferenzstreifen das Gerät mit einem Kran hochheben und wieder absetzen kann, ohne daß die Streifen verschwinden.

Die Kontinuumsmessungen wurden bei den höheren Energien durch einen starken Untergrund, der insbesondere die Profilflanken beeinflusst, verfälscht. Dies zeigt sich darin, daß die Liniendichte z.T. um den Faktor 1,5 größer ist als dem Füllgasdruck entspricht. Auch hier erwarten wir eine Verbesserung durch den Crowbarbetrieb. Es ist ferner in Vorbereitung, die Kontinuumsmessung mit einer side-on Gaslaser-Interferometrie zu vergleichen. In diesem Fall muß die Kontinuumsmessung nur das relative radiale Dichteprofil liefern.

Die Ergebnisse für Entladungen von 1 bzw. 1,5 MJ ergaben max. Iontemperaturen von 3 bzw. 4 keV. Diesen Werten ist eine dreidimensionale Maxwellverteilung der Deuteronen zugrunde gelegt. Da jedoch die Stoßzeiten für die Deuteronen bei diesen Versuchsbedingungen ca. 5 - 10 μsec , also etwa gleich der Finschlußzeit sind, liegt sehr wahrscheinlich eine anisotrope Energieverteilung der Deuteronen vor. Nimmt man eine zweidimensionale Maxwellverteilung an, so ergibt sich eine um etwa 1 keV höhere senkrechte Temperatur.

Die Anisotropie der Deuteronen soll durch Messung des Neutronenspektrums side-on und end-on

mit Kernspurplatten untersucht werden. In Vorbereitung hierzu wurden Kernspurplatten mit einer DD-Neutronenimpulsquelle bestrahlt, um zunächst die natürliche Linienbreite incl. Apparateprofil zu messen. Dieser Versuch wurde mit der freistehenden Neutronenquelle und mit der Quelle in der Theta-Pinch Spule durchgeführt, um den Einfluß von Neutronenstreuung an Teilen der Theta-Pinch Apparatur festzustellen.

Ein weiterer Hinweis für die Anisotropie des Plasmas ist die Feststellung (bei den interferometrischen Messungen), daß die Gesamtzahl der Teilchen bei Entladungen mit 1 MJ Energie, d.h. bei geringeren Temperaturen schneller abnimmt als bei Entladungen mit 1,5 MJ. Da in beiden Fällen die Plasmadichte etwa gleich ist, die Stoßzeiten aber mit der Temperatur steigen, wird im Falle der höheren Energie die Anisotropie länger aufrechterhalten, d.h. die Teilchen haben geringere achsenparallele Geschwindigkeit und entweichen langsamer durch die Spulenenden.

1.3.4 Vorläufiges LIMPUS-Experiment (M+S) an ISAR I [IPP 1/55]

Bei einem M+S-Experiment treten durch die Wellung der magnetischen Flächen in Bezug auf die Stabilität des Plasmas ungünstige Krümmungen auf. An ISAR I wurde ein vorläufiges Experiment mit einer gestuften rotationssymmetrischen Spule durchgeführt. Die Daten der Spule waren: 5 Teilspulen mit je 30 cm Länge, 3 mit 10,6 cm \emptyset und 2 mit 11,5 cm \emptyset . Die engen Spulen waren in der Mitte und an den Enden angebracht. Die übrigen Versuchsparameter entsprachen denen mit der geradlinigen Theta-Pinch Spule. Die Versuche wurden mit Energien von 0,34 und 1 MJ und mit Fülldrücken von 1 und $2 \cdot 10^{-2}$ Torr D_2 durchgeführt. Die ohne Verwendung der LIMPUS-Versuche vorhandene Plasmadrift wurde in ihrer Amplitude kaum verändert, jedoch wurde die größte Auslenkung bereits nach 5,5 statt nach 8,5 μ sec erreicht. Es ist anzunehmen, daß dies durch die Veränderung der Stromverteilung in der gestuften, gegenüber der geraden Spule zustande kommt. Bei Entladungen mit $2 \cdot 10^{-2}$ Torr Fülldruck wurden in Zonen ungünstiger Krümmung Instabilitäten in Form von Filamenten beobachtet, die auf Flute-Instabilitäten mit $m \geq 2$ hindeuten. Bei Entladungen mit 10^{-2} Torr Anfangsdruck, bei denen eine höhere Ionentemperatur erreicht wird, wurden derartige Instabilitäten nicht beobachtet. Berechnungen mit MHD- und "bounce"-Modell ergeben Flute-Instabilitäten mit $m \geq 2$. Es könnte sein, daß die beobachtete Stabilität des Plasmas auf die größeren Ionengyroradien zurückzuführen ist. Die bei $2 \cdot 10^{-2}$ Torr D_2 auch in gerader Spulenordnung auftretende Oszillation der Plasmasäule (wobbling) wurde bei gleichem Druck auch in der LIMPUS-Konfiguration beobachtet.

Um an Modellspulen für LIMPUS-Versuche hochfrequente Vakuum-Magnetfelder zu vermessen, wurde ein Kompensationsverfahren entwickelt, welches lokale relative Feldänderungen von kleiner als 0,1 % zu messen gestattet. Hierdurch sollen Abweichungen von der Rotationssymmetrie bestimmt werden, die bei LIMPUS-Spulen durch die endliche Breite des Kollektorschlitzes entstehen. Bisher wurde damit der Einfluß von Beobachtungsschlitzen am Spulenkörper untersucht. So verursacht z.B. ein Schlitz von 2 mm Breite bei einer Spulenwandstärke von ca. 70 mm eine Feldabnahme von 0,8 % am Ort der inneren Gefäßoberfläche ($r = 4,5$ cm).

1.4 Theta-Pinch ISAR II

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

ISAR II ist ein Energiespeicher von 500 kJoule Energieinhalt, aufgeteilt in zwei Teile von je 250 kJoule bei 40 kV Ladespannung. ISAR II befindet sich im Aufbau und wird zunächst als Last eine doppelt gespeiste Theta-Pinch Spule aufnehmen, wodurch eine Entladespannung von 2×40 kV erreicht werden wird. Die Spule wird zunächst glatt sein bei 100 cm Länge und 10 cm Durchmesser. Damit wird ein Magnetfeldanstieg von $5,3 \cdot 10^{10}$ G/sec und ein maximales

Magnetfeld von 90 kG erreicht. Der Betrieb erfolgt in Crowbarschaltung. Als Biasfeld können ± 2 kG überlagert werden.

Die zwei Vorkollektoren, von denen die Kabel der Einzelkreise gesammelt werden, sind in je 10 Einheiten unterteilt. Da diese Einheiten unter wählbaren Winkeln gegeneinander angeordnet werden können, ist die Einspeisung in lineare oder gekrümmte oder auch toroidale Theta-Pinch Konfigurationen möglich.

Projektierung und Aufbau der Anlage übernahm die Abteilung Technik. Im Bericht IPP 4/26 und im Abschnitt Abteilung Technik dieses Berichts sind die Daten der Anlage und der Stand der Aufbauarbeiten beschrieben. Als Vorionisierung ist eine gepulste axiale Entladung vorgesehen, deren Eigenschaften gegenwärtig untersucht werden. Die Arbeit daran ist unter 1.2 beschrieben.

1.5 Theta-Pinch ISAR III

(G. Becker, A. Heiss, H. Herold, E. Unsöld)

Nach dem vorläufigen Abschluß der Experimente zur Vorwärtsstreuung wurden anlässlich einer notwendigen Verlegung der Anlage folgende Änderungen getroffen: Die Batterie wurde auf 140 kJ (40 kV) erweitert, so daß 2 mal 30 kJ galvanisch von der Hauptbatterie getrennt zur Speisung von Spulenabschnitten verwendet werden können. Es kann wahlweise z- oder Theta-Pinch Vorionisierung angewandt werden. Ein niederinduktiver Crowbarschalter wurde entwickelt (Abt. Technik) und ist an der Anlage in Erprobung.

Im Sommer des Jahres wurde die Anlage wieder in Betrieb genommen und mit Untersuchungen über den Einfluß von magnetischen Spiegeln auf Stabilität und Einschluß des Plasmas im Theta-Pinch begonnen.

1.5.1 Vorwärtsstreuexperiment

(B. Kronast, H. Röhr, H. Herold)

Das Vorwärtsstreuexperiment wurde mit der Messung zweier Ionenprofile abgeschlossen. Das Experiment wurde bei einem Streuwinkel von 3° ausgeführt und lieferte bei reduzierter Batterieenergie (28 kJ) $T_1 = 108$ eV, $T_e = 45$ eV und $n_e = 6,3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Ein zweites Spektrum wurde bei 55 kJ gewonnen und lieferte $T_1 \approx 80$ eV. Für T_e war in diesem Fall keine eindeutige Auswertung möglich (entweder $T_e > 2 T_1$ oder Driftbewegung aller Elektronen gegenüber den Ionen) [37].

1.5.2 Stabilität und Plasmaeinschluß bei Anwendung von magnetischen Spiegeln

(A. Heiss, H. Herold, E. Unsöld)

Um einen Überblick zu gewinnen, wurde bei Verwendung von Spiegeln mit $R = 1,2, 1,8$ und $2,4$ (gemessenes Spiegelverhältnis) und bei Fülldrücken zwischen 10^{-2} und $5 \cdot 10^{-2}$ Torr D_2 das Plasma mit axial verteilten Greenschen Sonden und mit Kurzaufnahmen beobachtet. Außerdem wurde die Neutronenemission registriert und mit der interferometrischen Messung der Verlustraten begonnen. Die Spiegel wurden durch Querschnittsveränderungen der Spule (Spulenlänge 30 cm) hergestellt, wobei das Entladungsgefäß den Konturen der Spiegelspulen angepaßt war.

Schmieraufnahmen des Plasmas aus verschiedenen Querschnitten entlang der z-Achse sowie Kurzaufnahmen der Interferenzstreifen end-on (Abb. 1) zeigen Stabilität des Plasmas bei allen angewandten Spiegeln bei niederen Fülldrücken ($1 - 3 \cdot 10^{-2}$ Torr) über die Dauer der Halbwelle von $5 \mu\text{sec}$.

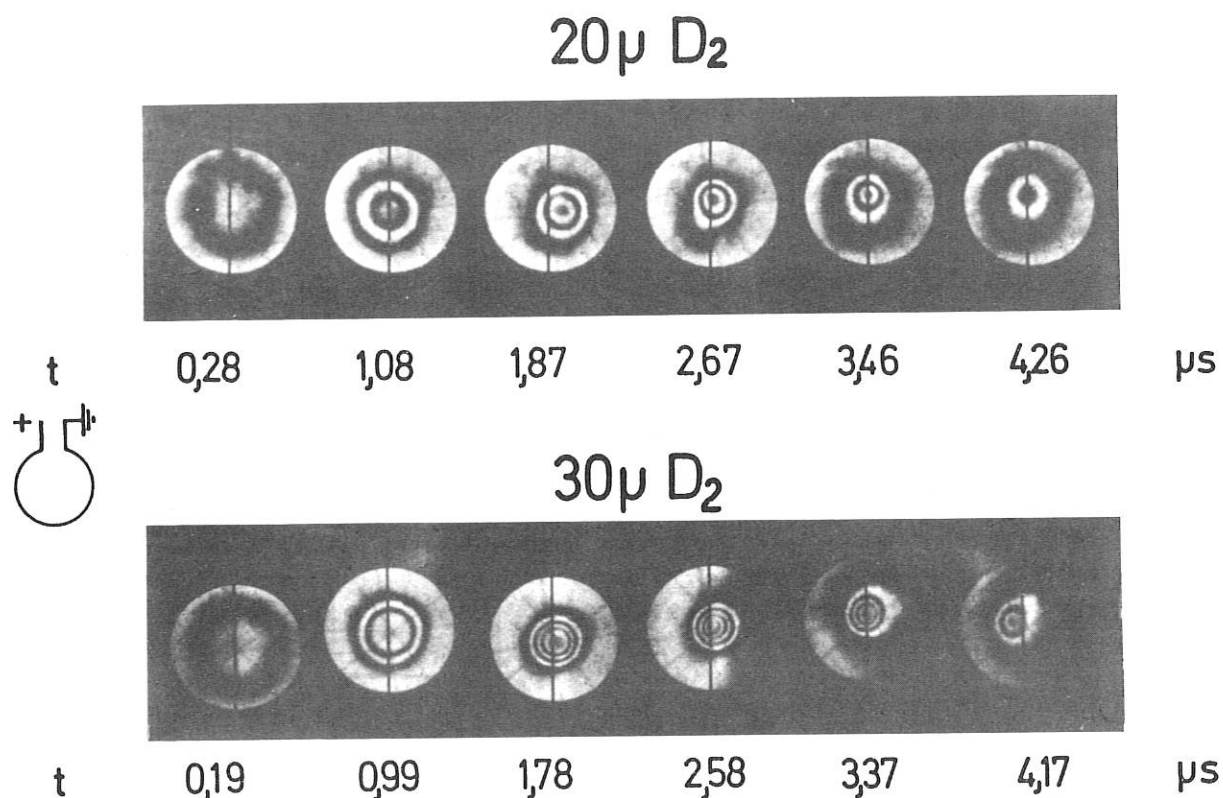


Abb. 1: Interferenzaufnahmen aus je einer Theta-Pinch Entladung an ISAR III bei $2 \cdot 10^{-2}$ und bei $3 \cdot 10^{-2}$ Torr Fülldruck bei Anwendung von magnetischen Spiegeln mit $R = 1,8$. Halbwelldauer = $5 \mu\text{sec}$, Gesichtsfelddurchmesser = $3,2 \text{ cm}$.

Jedoch tritt bei diesen Fülldrücken gelegentlich Rotation des Plasmas auf, die im letzten Drittel der Halbwelle zur Deformation des Plasmazylinders führt. Bei höheren Fülldrücken ($3 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$ Torr) wird Rotation häufiger beobachtet insbesondere bei Anwendung der z-Vorionisierung. Rotation des Plasmas tritt auch bei glatter Spule auf. Bei sehr starken Spiegeln führt die starke Einschnürung des Gefäßes zu Schwierigkeiten, besonders bei niederen Fülldrücken (10^{-2} und $2 \cdot 10^{-2}$ Torr). Es zeigen sich während der Vorionisierung (z-Pinch) in den Einschnürungen Wandentladungen (Gleitentladungen) und nachfolgend Instabilitäten während der Hauptentladung.

Die Auswertung der diamagnetischen Signale ergibt starke axiale Bewegungen des Plasmas bei allen Spiegeln. Die Liniendichte in der Mittelebene der Spule erreicht je nach Fülldruck und Spiegelverhältnis ein Maximum nach $0,6 - 1 \mu\text{sec}$, das zwischen dem $1,5 -$ bis 2 -fachen der Anfangsliniendichte liegt.

Zur Untersuchung des Energiespektrums der axial aus den Spulenden austretenden D^+ -Ionen wurde ein Teilchenspektrometer konstruiert. Es handelt sich um einen elektrostatischen 45° -Parabelbahnanalysator mit 10 Kanälen. Die Plasmateilchen durchlaufen ein differentiell gepumptes Kollimatorrohr mit Siebblenden zur Verringerung der Teilchenstrahldichte und treten unter 45° in einen Plattenkondensator. Im Feld des Kondensators erfahren die Ionen eine Energiedispersion und werden nach Sortierung durch Austrittsspalte in 10 Kanälen nach dem Prinzip des Daly Detektors registriert. Mit dem Analysator sollte die Aufnahme eines zeitaufgelösten Spektrums im Energiebereich zwischen $0,1 - 5 \text{ keV}$ bei einer Entladung möglich sein.

1.6 Theta-Pinch ISAR IV

(U. Schumacher, R. Wilhelm, H. Zwicker)

In diesem Experiment wird dem Plasma während der Kompression sehr hohe kinetische Energie gegeben. Dies geschieht durch Anwendung hoher Stoßspannungen (40-65 kV an der Spule). Die Vorgänge in der Kompressionsphase sollen untersucht werden. Es wird eine besonders gute Ausnutzung der gespeicherten Batterieenergie erwartet.

Vor Aufnahme der Experimente am Theta-Pinch wurde die z-Pinch Vorionisierung näher untersucht. Spektroskopische Messungen ergaben die Zustandsgrößen des vorionisierten Plasmas in ihrem räumlichen und zeitlichen Verhalten. Aus der Starkverbreiterung von $D\gamma$ und $D\beta$ wurde die Elektronendichte $n_e(r,t)$ bestimmt (Abb. 2).

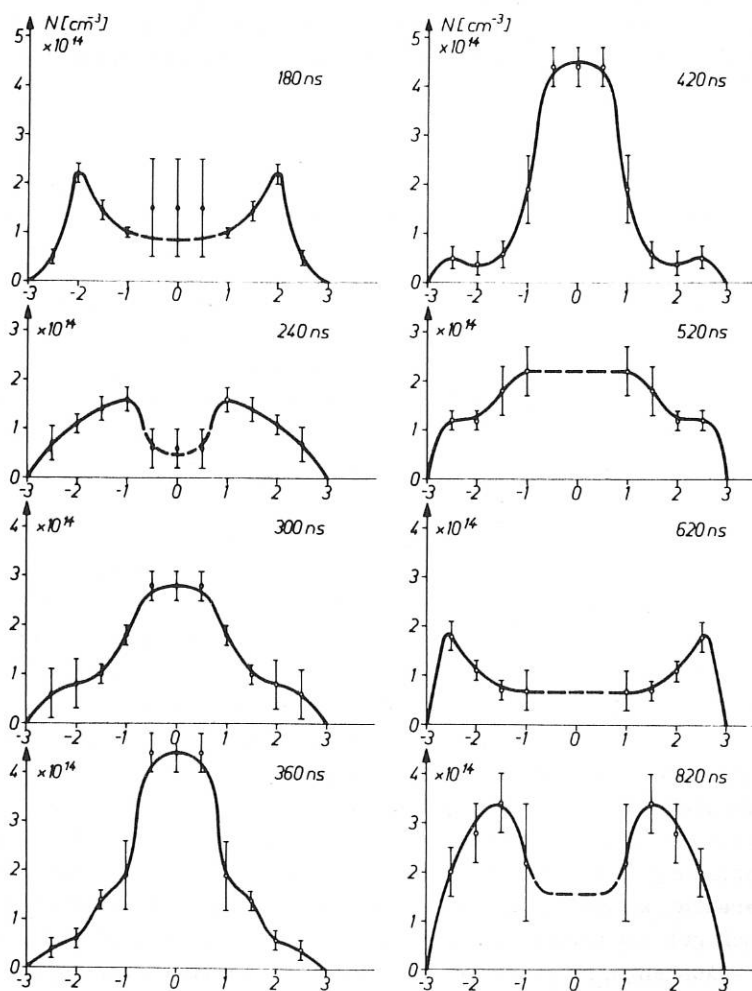


Abb. 2: Elektronendichteverteilung der Vorionisierung bei ISAR IV

Es zeigte sich eine radial nach innen laufende Schicht, die nach dem Kompressionsmaximum symmetrisch mit einer kinetischen Energie der Deuteronen von etwa 100 eV expandiert. Nach Reflexion des Plasmas an der Gefäßwand steigt der mittlere Ionisierungsgrad von etwa 25 % auf etwa 40 % an. Die Elektronentemperatur ergab sich aus der Absolutintensität und dem

Verhältnis dreier Balmer-Linien zu 0,3 eV. Daneben deuten andere Messungen (Verunreinigungslinien höherer Ionisierungsstufen, Röntgenstrahlung) auf nichtthermische Elektronen mit höherer Energie hin.

Zum geplanten Zeitpunkt (Juli 1966) konnte die Hauptbatterie in Betrieb genommen werden. Zur Untersuchung der mit der Batterie erreichbaren Plasmadaten wurden zunächst die Vorionisierung und der Ausgangsdruck variiert. Im Druckbereich von $1,5 - 6 \cdot 10^{-2}$ Torr D_2 zeigte der Neutronenfluß ein sehr flaches Maximum von $2 \cdot 10^{13}$ N/sec bei $2 \cdot 10^{-2}$ Torr D_2 . Außerhalb dieses Bereichs fiel die Neutronenemission mit dem Fülldruck steil ab.

Die Dauer des Neutronenimpulses beträgt etwa $2 \mu\text{s}$. Dies spricht bei der relativ kurzen Spule von 14 cm für eine starke Anisotropie der Ionen.

Die aus dem Bremskontinuum ermittelte Elektronendichte erreicht Maximalwerte von $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ bei $2 \cdot 10^{-2}$ Torr Ausgangsdruck. Die Elektronentemperatur wurde zunächst durch Absorption der weichen Röntgenstrahlung in verschiedenen Gasstrecken bestimmt. Erste Messungen ergaben Elektronentemperaturen von maximal 800 eV. Genauere Angaben über die Ionentemperatur, die einige keV beträgt, sind erst möglich, wenn die genaue Verteilung des Plasmas in der Spule gemessen ist.

1.7 Stoßfreie Kompression und Turbulenzheizung eines Plasmas bei Ausgangsdichten von 10^{11} bis $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

(G. Hofmann, P. Igenbergs, M. Keilhacker, M. Kornherr, M. Niedermeyer, F. Pecorella)

Die im Jahresbericht 1965 erwähnte 10 kJ Batterie zur Erzeugung extrem schneller Stoßwellen in einer Theta-Pinch Spule von 60 cm Länge und 15,8 cm \emptyset (Anstieg des Magnetfeldes in $0,35 \mu\text{s}$ auf den Maximalwert von 15 kG) wurde 1966 im wesentlichen fertiggestellt, so daß im Januar 1967 mit der Inbetriebnahme begonnen werden konnte. Über Einzelheiten von Konstruktion und Montage wird im Abschnitt Abt. Technik berichtet.

Neben der Fertigstellung dieser "Turbulenz"-Batterie galt das Hauptaugenmerk der Entwicklung und Untersuchung einer geeigneten Vorionisierung für Wasserstoffplasmen mit Ausgangsdichten von 10^{11} bis einige 10^{14} cm^{-3} , sowie der Vorbereitung von Meßmethoden zur Untersuchung von Stoßwellen und der turbulenten Aufheizung eines Plasmas. Zur Vorionisierung wird die UV-Strahlung zweier z-Pinche hoher Dichte verwandt, die sich an den beiden Enden des Entladungsgefäßes befinden (Abb. 3). Mit dieser Strahlungsvorionisierung, die sich besonders zur Ionisierung von Plasmen niedriger Ausgangsdichte eignet, wurde bei 0,01 Torr H_2 Fülldruck in der Mitte der Theta-Pinch Spule ein Ionisierungsgrad von 5 % erreicht (Abb. 4). Zur Erhöhung des Ionisierungsgrades sind ein gepulster Hochspannungs-z-Pinch ($U_0 = 120 \text{ kV}$) oder eine hochfrequente Theta-Pinch-Entladung ($f \approx 1 \text{ MHz}$) vorgesehen, die jedoch bisher nur ohne die Strahlungsvorionisierung untersucht wurden. Die Theta-Pinch Vorionisierung konnte bis herab zu ca. 10^{-3} Torr H_2 Fülldruck gut reproduzierbar gezündet werden und erzeugte ein - allerdings nur schwach ionisiertes - Ausgangsplasma mit einem Sauerstoff-Verunreinigungsgrad $< 0,5 \%$, die z-Pinch Entladung dagegen konnte ohne Zündhilfe reproduzierbar nur bei Drücken oberhalb $6 \cdot 10^{-3}$ Torr H_2 gezündet werden.

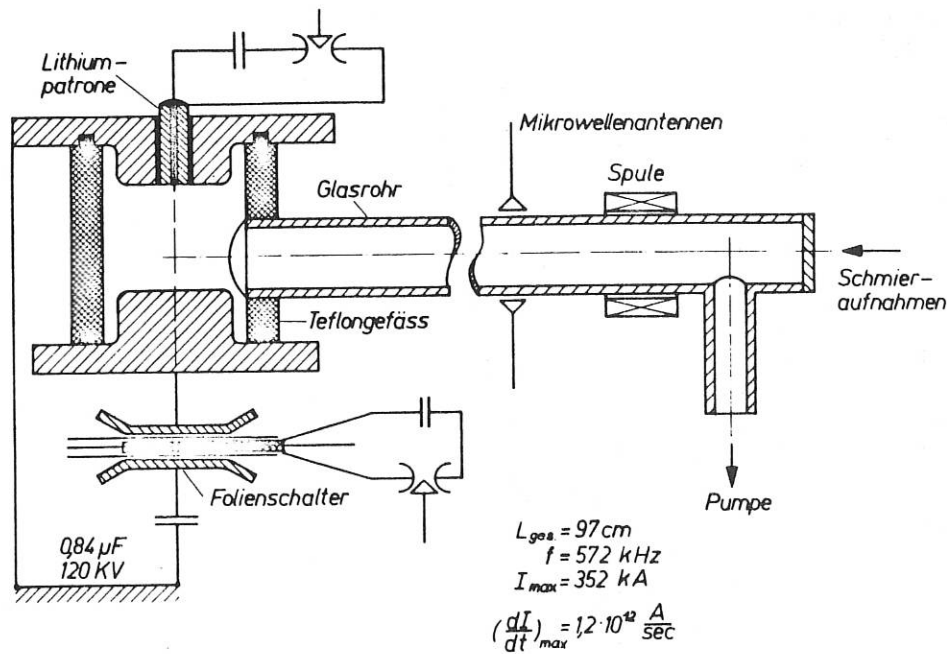


Abb. 3: Schema des ersten Experiments zur Strahlungsvorionisierung

1.7.1 Strahlungsvorionisierung

(G. Hofmann, F. Pecorella)

Es wurde eine Lichtquelle entwickelt, die einen so intensiven Strahlungsimpuls unter 800 \AA aussendet, daß sich damit molekularer Wasserstoff in einem brauchbaren Maße ionisieren läßt 12, IPP 1/43. Diese Lichtquelle ist ein sehr schneller Hochspannungs-z-Pinch, der kurzfristig mit der dichten Leuchtsubstanz (beim ersten Experiment Lithium, später Helium oder Wasserstoff) gefüllt wird. Die Strahlung der aufgeheizten Leuchtsubstanz photoionisiert das Wasserstoffvolumen, das sich in einem seitlich an das Entladungsgefäß des z-Pinches anschließenden Rohransatz befindet (Abb. 3).

Die Elektronendichte des photoionisierten Wasserstoffs wurde mit einem Mikrowelleninterferometer, die elektrische Leitfähigkeit aus dem Skineffekt bestimmt.

Abb. 4 zeigt den Ionisierungsgrad, der sich mit Lithiumdampf als Leuchtsubstanz bei Bestrahlung von beiden Seiten erreichen läßt. Die elektrische Leitfähigkeit des photoionisierten Wasserstoffs ist so hoch, daß bei einer Magnetfeldfrequenz von 500 kHz (\approx Frequenz der Hauptentladung) die Skintiefe in der Spulenmitte etwa $0,5 \text{ cm}$ beträgt (Gefäßradius 4 cm).

Um die Strahlungsleistung der Lichtquelle bei gegebenem Aufbau des z-Pinch Kreises weiter zu steigern, muß die Füllung der Lichtquelle so gewählt werden, daß die Emission unter 800 \AA verstärkt wird. Zu diesem Zweck wurden die Emissionsspektren von Heliumplasmen (starke Linien unter 800 \AA) und Wasserstoffplasmen (reines Kontinuum unter 800 \AA) für die verschiedensten Dichten und Temperaturen berechnet und miteinander verglichen. Modell: Isothermes, homogenes sphärisches Plasma im lokalen thermischen Gleichgewicht, gesamte Strahlungsleistung integriert über das Spektrum, ist 100 MW (abgeschätzt aus den Lithiumexperimenten); damit ist der Radius der Plasmakugel für gegebene Dichte und Temperatur festgelegt.

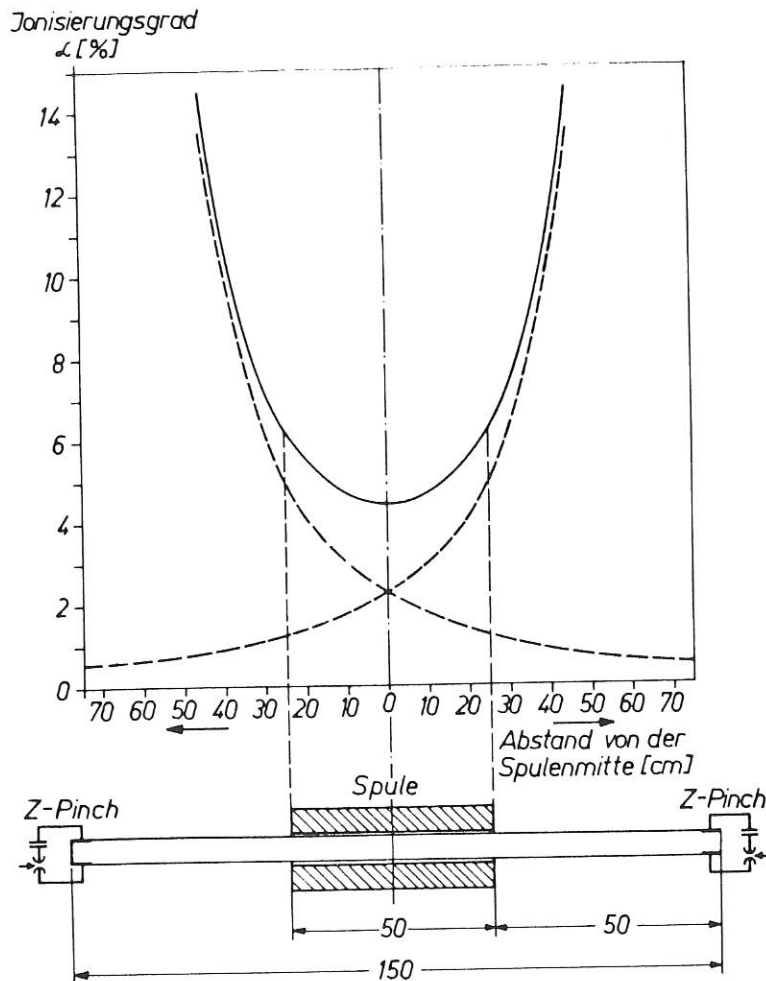


Abb. 4: Bisher erreichter Ionisierungsgrad bei Bestrahlung von beiden Seiten und Lithiumfüllung ($p_0 = 0,01$ Torr H_2)

Ein relatives Maß für die Brauchbarkeit des jeweiligen Plasmas als Lichtquelle unter 800 \AA ist der Ionisierungsgrad selbst, der sich z.B. innerhalb einer μsec in 100 cm Entfernung von der Lichtquelle in Wasserstoff von 0,01 Torr Neutralgasdruck einstellt. Dieser Ionisierungsgrad wurde für die verschiedensten Parameter berechnet und in Abb. 5 aufgetragen.

Bei niedrigen Dichten (10^{18} cm^{-3}) ist die Heliumlinienstrahlung noch zu 50 % am erreichten Ionisierungsgrad beteiligt, bei den höheren Dichten (ab 10^{19} cm^{-3}) trägt praktisch nur noch das Kontinuum bei.

Wasserstoff ist brauchbarer als Helium (u.a. wegen günstigerer Lage des Rekombinationskontinuums und niedrigerer Ionisierungsenergie). Der erreichbare Ionisierungsgrad ist höher und der günstige Temperaturbereich nicht so eng begrenzt wie bei Helium. Es ist nützlich, Dichten von einigen 10^{19} cm^{-3} anzustreben, da hier die (verlorene) innere Energie der Plasmakugel vergleichsweise niedrig wird.

Die experimentelle Aufgabe bestand nun darin, einen gepulsten Gaseinlaß zu bauen, der es erlaubt, eine möglichst scharf begrenzte Wolke Wasserstoff von etwa 1 at. in das z-Pinch Entladungsgefäß einzufüllen. Ein derartiges Ventil wurde gebaut und arbeitet nun zufriedenstellend mit Öffnungszeiten von etwa $50 \mu\text{sec}$. Zur Zeit wird das dynamische Verhalten der sich ausbreitenden Neutralgaswolke mit Piezosonden und Ionisationsröhren untersucht.

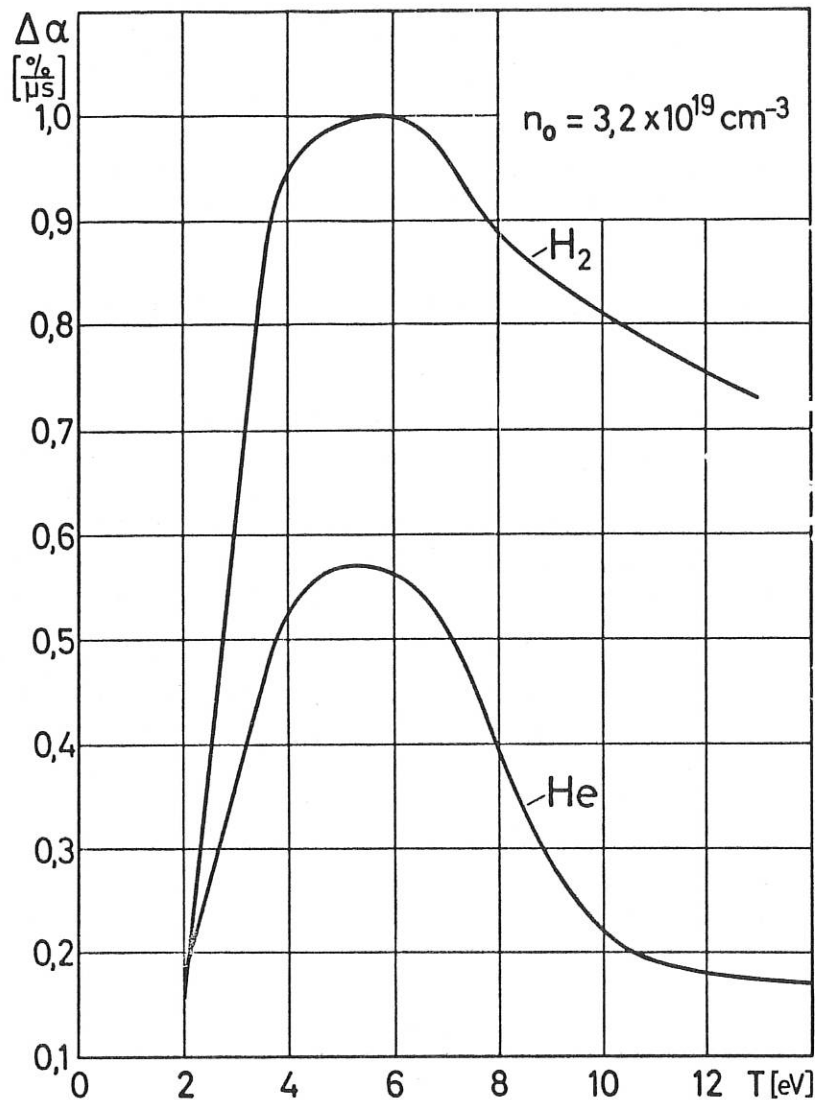


Abb. 5: Ionisierungsgrad als Funktion der Temperatur bei einer Neutralgasdichte von $3,2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ für Helium und Wasserstoff

1.7.2 Elektrostatischer Teilchenenergie-Analysator

(M. Niedermeyer)

Zur Untersuchung der Aufheiz- und Endverlustmechanismen wurde ein Energieanalysator für Elektronen bzw. Ionen gebaut. Die geladenen Teilchen durchlaufen zwischen zwei austauschbaren Blenden das Radialfeld eines 90° -Sektors aus einem Zylinderkondensator. Je nach Wahl der Blenden wird ein Energieauflösungsvermögen von 0,7 % bis 3 % im Energiebereich von 100 eV bis 10 keV erreicht. Die Eintrittsöffnung kann bis zu einer Größe von 10 mm^2 gewählt werden, der halbe Öffnungswinkel beträgt ca. 3° .

Elektronen und positive Ionen werden hinter der Austrittsblende mit einem Szintillationsdetektor über einen Photomultiplier gemessen. Elektronen werden unmittelbar auf einen Al-bedampften Plastikszintillator beschleunigt, positive Ionen lösen an einem Molybdän-

Gitter Sekundärelektronen aus, die auf den Szintillator beschleunigt werden. Man erreicht eine Zeitauflösung < 10 ns und eine Nachswahrscheinlichkeit für ein einzelnes Teilchen von ca. 0,5, d.h. es ist möglich, bei größtmöglicher Zeitauflösung und einem statistischen Fehler < 10 % Teilchenströme bis herab zu $3 \cdot 10^{-9}$ A zu messen.

Zur Eichung des Analysators wurde eine Elektronenquelle mit Wolfram-Glühkathode und eine Elektronenstoß-Ionenquelle für Wasserstoff-Ionen gebaut und die Eichung durchgeführt.

1.7.3 Stoßfreie Energiedissipation bei der Kompression eines Plasmas sehr niedriger Dichte

(P. Igenbergs)

An einem kleinen Theta-Pinch Experiment ($E = 150$ J, $\dot{B} = 3 \times 10^9$ G/s, $T = 3,6 \times 10^{-6}$ s) wurde das dynamische Verhalten eines stoßfreien, schwach diamagnetischen Plasmas mit Elektronendichten zwischen 10^{11} cm^{-3} und 10^{13} cm^{-3} untersucht und versucht, daraus Aufschluß über eventuell auftretende stoßfreie Dissipationsmechanismen zu gewinnen. Die Elektronendichte wurde end-on und side-on mit einem 4 mm Mikrowelleninterferometer gemessen, die räumlich und zeitlich aufgelöste Verteilung der Plasmastromdichte mit Hilfe von Magnetfeldsonden.

Ein Vergleich der Meßergebnisse mit numerischen Lösungen der MHD-Bewegungsgleichungen unter Berücksichtigung eines speziellen stoßfreien Reibungsterms (vgl. Abschnitt 4) zeigt im Zeitintervall bis zur ersten Kompression gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Modell und erlaubt es, Schranken für das Verhältnis $\beta = v_{e\varphi} / v_{eth}$ ($v_{e\varphi}$ ist die gerichtete azimuthale, v_{eth} die thermische Geschwindigkeit der Elektronen) anzugeben. Mit der Annahme, daß β über den Plasmaradius konstant ist, ergeben sich für β Werte von etwa 1 und mit der Annahme, daß die Anfangsdichte örtlich konstant ist - wobei dann β vom Ort abhängen kann - Werte von etwa 0,3 [11].

2. Toroidaler Theta-Pinch

(J. Junker, W. Lotz, F. Rau, E. Remy, H. Wobig, G.H. Wolf)

2.1 Einleitung

Im toroidalen Theta-Pinch wird ein Hoch- β -Plasma ohne Enden erzeugt. Es sind daher die bei den linearen Entladungen auftretenden Endeffekte auszuschließen. In der M+S-Konfiguration ist der Plasmaschlauch von toroidal geschlossenen magnetischen Flußröhren umgeben. Hierbei stellt die Frage nach der Stabilität der Gleichgewichtskonfiguration das wesentliche Problem dar, da in einer solchen Konfiguration notwendig Gebiete ungünstiger konvexer Krümmung auftreten.

Durch Überlagerung eines zu einem rein azimuthalen Hauptfeld orthogonalen Multipol-Feldes entsteht eine Anordnung, bei welcher der toroidale Plasmaschlauch nur von Feldlinien mit günstiger (konkaver Krümmung umgeben ist, wodurch die Stabilität (zumindest MHD) der Gleichgewichtskonfiguration gewährleistet ist. Die magnetischen Flußröhren sind dann jedoch nicht mehr toroidal geschlossen ("offene Anordnung"), weshalb entlang des toroidalen Plasmaschlauches kreisförmig geschlossene Cusp-Linien mit den ihnen eigentümlichen Verlustmechanismen auftreten. Gegenüber anderen Cusp-Anordnungen, wie z.B. dem Spindel-Cusp, besteht der Vorteil, daß die Verluste ausschließlich durch Cusp-Linien erfolgen (statt zusätzlich durch Cusp-Spitzen) und daß außerdem durch Anwendung des toroidalen Theta-Pinches

unmittelbar in die gewünschte Konfiguration komprimiert wird. Dadurch können Temperaturen, Dichten und β -Werte erreicht werden, wie sie z.B. beim Spindel-Cusp nur durch größeren Aufwand (z.B. Einschub von Plasma) zu erzielen sind. Von den "offenen" toroidalen Experimenten ist technisch ein Übergang zu M+S-ähnlichen bzw. Stellarator-ähnlichen Konfigurationen möglich.

Um die Jahreswende 1965/66 begann der Umzug aus der experimentellen Abteilung des MPI in die Abteilung 1 des IPP. Das Jahr 1966 war gekennzeichnet durch zahlreiche technische Schwierigkeiten als Nachwirkung des Umzugs, Schwierigkeiten, die sonst nur bei der ersten Inbetriebnahme einer Apparatur aufzutreten pflegen.

2.2 Toroidaler Theta-Pinch mit Überlagertem Hexapolfeld

Für die Experimente in toroidaler Cusp-Geometrie wurde im Berichtsjahr die toroidale Theta-Pinch Apparatur "SPINNE" im MPI abgebaut und in der Abteilung 1 des IPP wieder aufgebaut. Die SPINNE hat einen großen Radius von 26 cm und einen kleinen Radius von 3 cm, die Theta-Pinch Spule ist einwindig, so daß bei voller Ausnutzung der Batteriekapazität von 50 kJ ein Feldanstieg von 1×10^{10} G/s erreicht werden kann. Das Hexapolfeld wird erzeugt durch sechs Leitergruppen (zwischen der Theta-Pinch Spule und dem Pyrex-Glasgefäß), die neuerdings in ihrer Induktivität so abgeglichen sind, daß in allen sechs Leitergruppen etwa der gleiche Strom fließt. Die Hexapolbatterie hat ebenfalls einen Energieinhalt von 50 kJ bei einer Ladespannung von 18 kV. Beide Kreise der Apparatur haben die gleiche Entladefrequenz und werden etwa gleichzeitig gezündet; im Strommaximum können beide Kreise mit Crowbar-Ignitrons kurzgeschlossen werden, so daß der Stromabfall wesentlich verlangsamt wird.

Das Berichtsjahr war ausgefüllt mit der Behebung von technischen Schwierigkeiten, die durch den Umzug verursacht oder verschlimmert wurden. Beim Beginn der Hauptentladung und der Hexapolentladung war zum Beispiel der Jitter so groß, so daß alle elektronischen Geräte überprüft und notfalls geändert werden mußten; die Mutterignitrons wurden durch Mutterfunkenstrecken ersetzt und die Zündspannung von 2 kV auf 5 kV heraufgesetzt; eine bessere Temperaturkonstanz in der Meßkabine war erforderlich. Da die Störstrahlung in der Halle L1 sehr viel höher war als im MPI, mußten die Messkabel mit einer massiven Abschirmung versehen werden, etc.

Die Batterie wurde erweitert von 2×32 auf 2×50 kJ. Dabei erwies es sich als notwendig, die einzelnen Drähte der sechs Hexapol-Leitergruppen von Litze auf Volldraht umzustellen und diese einschließlich der Anschlüsse in Silikongummi einzugießen. Durch geeignete Wahl der Anschlüsse gelang es, die Stromverteilung so zu beeinflussen, daß in allen sechs Leitergruppen nahezu der gleiche Strom fließt. Die Stromverteilung kann um bis zu 20% geändert werden.

Die Vorentladungsbatterie wurde von 6 auf 18 Kondensatoren von je $0,5 \mu\text{F}$ erweitert und gleichzeitig die Ladespannung von 23 auf 25 kV erhöht, um eine bessere Vorionisierung zu erreichen.

Es wurde mehrmals versucht, die Messungen von 1965 zu wiederholen. Neben den nicht tolerierbaren obengenannten Störungen zeigten sich Unstimmigkeiten bei der Absoluteichung des für die Messung der Kontinuumstrahlung benutzten Duochromators. Daraufhin wurde dessen Austrittsspalt durch eine Lichtfaseroptik mit dem Multiplier verbunden. Eine Wiederholung der Messungen nach Beseitigung der Störungen ist vorbereitet.

Bei der oben beschriebenen Veränderung der Stromverteilung in den Hexapolleitern zeigte sich, daß auf den Drehspeigelbildern die Lage der Cusp-Linien während eines Zeitintervalls

von etwa $2 \mu\text{s}$ zu erkennen ist. Diese Cusp-Linien sind auch auf Bildern von 1965 nachweisbar, wurden damals jedoch als "Dreckeffekt" (z.B. Spiegelung im Glas) angesehen und nicht weiter beachtet. Eine Vermessung dieser Cusp-Linie mit Photomultiplier im Sichtbaren ergab eine Halbwertsbreite von 0,7 bis 1,1 mm; der doppelte Ionengyrationsradius in der Grenzschicht zwischen Plasma und Magnetfeld ist dagegen etwa 3 mm. Da dem Hexapolfeld das azimutale Hauptfeld überlagert ist, strömt das Plasma in der Cusp-Linie nicht senkrecht auf die Gefäßwand zu, sondern schräg, so daß die für die Verlustrate wirksame Breite der Cusp-Linie um etwa einen Faktor 10 zu verkleinern ist, also auf etwa 0,1 mm. Die Verlustratenmessungen von 1965 werden durch diese unabhängige Messung der Cusp-Linienbreite innerhalb der damals angegebenen Fehlergrenzen von etwa einem Faktor 2 bestätigt.

Zur Elektronentemperaturbestimmung wird u.a. die Verunreinigungsstrahlung (Sauerstoff und Kohlenstoff) in ihrem zeitlichen Verlauf beobachtet. Ist die Dichte bekannt, so kann aus den gemessenen Ionisierungsraten die Elektronentemperatur bestimmt werden. Für diesen Zweck wurden die Bindungsenergien der Elektronen in den verschiedenen Schalen der infrage kommenden Ionen berechnet und anschließend die Wirkungsquerschnitte für Ionisierung durch Elektronenstoß bestimmt. Ein Vergleich mit experimentell gemessenen Wirkungsquerschnitten und mit glaubwürdigen theoretischen Berechnungen von Rudge und Schwartz ¹⁾ führte zur empirischen Berechnung von bisher noch nicht gemessenen Wirkungsquerschnitten [41, 42, IPP 1/47, IPP 1/49, IPP 1/50, IPP 1/54].

2.3 Toroidaler Theta-Pinch mit rein azimutalem Magnetfeld

Mit der in IPP 1/53 beschriebenen Anlage wurden Untersuchungen zur Theta-Pinch Vorionisierung durchgeführt. Zur Erhöhung der Entladefrequenz wurde die Anzahl der Funkenstrecken verdoppelt (jeder der vier Kondensatoren der Vorionisierungsbatterie wird über eine Funkenstrecke entladen) und die Windungszahl der Theta-Spule halbiert. Mit der Kondensatorbatterie von 600 J Energieinhalt bei 25 kV Ladespannung wird mit einer 4-windigen Torusspule eine Entladefrequenz von 300 kHz erreicht. Die maximale Magnetfeldstärke erreicht 2,8 kG.

Es zeigte sich, daß die Vorionisierung besser reproduzierbar war, wenn mit jeder Entladung auch die Hauptbatterie (4 kJ, 8kV) gezündet wurde.

Untersucht wurde der Einfluß des Fülldrucks auf das Zündverhalten, Temperatur und Dichte des Wasserstoffplasmas. Zur Diagnostik wurde verwendet eine Drehspiegelkamera und ein Spektrograph zur Messung des zeitlichen Verlaufs der H_{β} -Intensität und der Kontinuumsintensität bei $\lambda = 5000 \text{ \AA}$. Anhand der Lichtintensitäten läßt sich feststellen, im Druckbereich von $4 \cdot 10^{-2}$ Torr bis $5 \cdot 10^{-3}$ Torr zündet das Plasma reproduzierbar und zwar bei $4 \cdot 10^{-2}$ Torr in der 2. Halbwelle, bei $2 \cdot 10^{-2}$ Torr in der 3., bei 10^{-2} Torr in der 3. bis 4. und bei $5 \cdot 10^{-3}$ Torr in der 6. bis 7. Halbwelle der Vorionisierung. Unterhalb $5 \cdot 10^{-3}$ Torr ließ sich keine Zündung mehr erreichen. Aus den spektroskopischen Messungen ergaben sich einige Halbwellen nach der Zündung des Plasmas Temperaturen von wenigen eV und vollständige Ionisation. Eine genauere Betrachtung der Drehspiegelbilder ergab, daß das periodische Aufleuchten des Plasmas über den ganzen Querschnitt des Glasrohres bis zu einer Viertelwelle später auftrat als beim Nulldurchgang des Stromes.

Weitere Untersuchungen dienen der Bestimmung des Verunreinigungsgrades und des Einflusses von Verunreinigungen auf das Zündverhalten.

1) M.R.H. Rudge and S.B. Schwartz, Proc. Phys. Soc. 88, 563 (1966)

3. Theoretische Arbeiten

(R. Chodura, D. Düchs, G. Lehner, F. Pohl, W. Schneider)

Die theoretischen Arbeiten finden in enger Wechselwirkung mit den Experimenten statt. Man kann deshalb darauf verzichten, hier jedes einzelne Problem aufzuzählen. In diesem Sinne handelt es sich im folgenden nur um eine kurze Erläuterung der umfangreicheren Arbeiten.

3.1 Anomale Reibung (R. Chodura)

Zur Beschreibung von Plasmen geringer Dichte genügt das herkömmliche Ohmsche Gesetz der Magnetohydrodynamik nicht, wenn die elektrischen Felder kritische Werte überschreiten. Für diesen Fall wurde ein zusätzlicher anomaler Reibungsterm eingeführt ^{1),2)} der die Abbremsung der Elektronen durch die Anregung von Zweistrominstabilitäten und ihre Wechselwirkung mit angeregten Wellen phänomenologisch beschreibt. Diese Methode wurde zur Beschreibung eines theta-pinchartigen Experiments angewandt, um durch Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen den erwähnten Reibungsterm zu bestimmen. Darüber hinaus wurde untersucht, wie sich Kompressionswellen in diesem Modell verhalten, insbesondere ob und wann sie sich überschlagen.

Die Ergebnisse wurden vorgetragen bei der First European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, München 1966 und bei der Conference on Turbulence and Collision Free Shock Waves in Plasmas, Cleveland (Ohio) USA 1966 [11].

3.2 Dreiflüssigkeitsmodell (D. Düchs, teilweise in Zusammenarbeit mit G. Decker, H. Herold bzw. H. Griem)

Es wurden Rechnungen zur Ionisierung und zum dynamischen Einschluß von Plasmen durchgeführt. Deren Ergebnisse wurden auf der First European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, München 1966 [12] vorgetragen.

Im Dreiflüssigkeitsmodell konnten kleine Zusätze von Sauerstoff (O I - O IX) und Kohlenstoff (C II - C VII) berücksichtigt werden, um Strahlungs- und Ionisierungsverluste zu untersuchen. Die Ergebnisse wurden veröffentlicht [14].

3.3 Plasmarotation (D. Düchs)

Eine wichtige Eigenschaft von Theta-Pinch Plasmen ist deren Rotation und Drift mit nachfolgender Instabilität. Die bisherigen Erklärungsversuche gehen von der Annahme einer im wesentlichen starren Rotation aus. Im Gegensatz dazu wurde hier versucht, ohne solche Voraussetzungen auszukommen. Dazu wurde ein Rechenprogramm entwickelt, das die Dichte n , die Geschwindigkeit v_r , v_φ , die Temperatur T_e , T_i und die Magnetfelder B_r , B_φ , B_z als Funktionen der Zylinderkoordinaten r , φ und der Zeit liefert. Es wurde auf eine Theta-Pinch Entladung mit überlagertem Multipolfeld angewandt. Dabei ergab sich u.a., daß das Plasma keineswegs starr rotiert. Eine Veröffentlichung dieser Ergebnisse wird zur Zeit vorbereitet.

1) J.H. Adlam, L.S. Holmes, Nucl. Fusion 3, 62 (1963)

2) G. Bardotti, A. Cavaliere, F. Engelmann, Nucl. Fusion 6, 46 (1966)

3.4 Vakuumfelder in Theta-Pinch Spulen (F. Pohl)

Das Vakuumfeld in Theta-Pinch Spulen ist nicht rotationssymmetrisch, was Instabilitäten und vor allem Driftbewegungen des Plasmas verursacht. Zu ihrer Vermeidung ist es nötig, die Spulen so zu bauen, daß die Abweichungen von der Rotationssymmetrie so klein wie möglich werden. Neben normalen Theta-Pinch Spulen wurden auch gewellte "LIMPUS"-Spulen betrachtet, die mit Hilfe von magnetischen Linsen im Adapter korrigiert werden können. Die Ergebnisse erscheinen in IPP 1/57.

3.5 Neutronendiagnostik (G. Lehner, F. Pohl)

Da an der großen Theta-Pinch Anlage sehr viele Neutronen entstehen (10^{10} - 10^{11} pro Entladung), soll der Versuch gemacht werden, durch möglichst detaillierte Messungen der Neutronenausbeute, der Neutronenenergieverteilung (evtl. in Abhängigkeit vom Winkel) und der Neutronenflußverteilung (als Funktion des Winkels) Aufschlüsse über die Geschwindigkeitsverteilung der Ionen, insbesondere deren eventuelle Anisotropie etc. zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurden alle benötigten Größen für verschiedene Geschwindigkeitsverteilungen und für die verschiedenen interessanten Parameter berechnet. Ein Bericht darüber wird vorbereitet.

3.6 Messungen von Magnetfeldern mit Hilfe der Streuung von Laserlicht (G. Lehner, F. Pohl)

Die störungsfreie und lokale Messung von Magnetfeldern in heißen Plasmen ist ein sehr schwieriges Problem. Es erscheint nicht ganz ausgeschlossen, daß man die Streuung von Laserlicht dazu benutzen kann. Wenn nämlich der Streuvektor hinreichend genau senkrecht auf dem Magnetfeld steht, ist das inkohärente Streuspektrum mit der Elektronengyrofrequenz moduliert¹⁾. Um diese Möglichkeit genau diskutieren zu können, wurde das Problem eingehend untersucht und die zu erwartenden Streuspektren wurden für eine Anzahl von Parametern numerisch berechnet. Ein Bericht wird vorbereitet.

3.7 Endverluste am Theta-Pinch (W. Schneider)

Das Problem der Endverluste am Theta-Pinch soll mit Hilfe eines 2-dimensionalen Programms diskutiert werden, das die dynamischen Größen als Funktion der Ortsvariablen (r, z) und der Zeit liefert. Zunächst wurde ein relativ einfaches Modell herangezogen, in dem nur eine Flüssigkeit (d.h. Ionen- und Elektronentemperatur sind gleich) unendlicher Leitfähigkeit und isotropen Drucks im radialen Gleichgewicht betrachtet wird. Rechnungen wurden für ISAR III (zunächst unter Vernachlässigung der Wärmeleitung) für verschiedene Magnetfeldkonfigurationen (Spiegel) insbesondere im Hinblick auf Massenverluste durchgeführt. Der Einfluß der Wärmeleitung auf die axialen Energieverluste wird noch untersucht.

1) Laaspere, J. Geophys. Res. 65, 3955 (1960)

4. Spezielle Untersuchungen und Meßmethoden an heißen Plasmen

4.1 Streuung von Laserlicht an Plasmen (G. Decker, B. Kronast, H. Röhr, P. Stoye, H. Zwicker)

4.1.1 Vorwärtsstreuexperimente

Das erste Vorwärtsstreuexperiment an ISAR III konnte im Frühjahr dieses Jahres mit der Messung zweier Ionenprofile abgeschlossen werden (siehe 1.5.1). Da die Ergebnisse als Mittel aus ca. 35 Entladungen gewonnen werden mußten, wurden Maßnahmen vorbereitet, die ein Spektrum aus einer Entladung zu bestimmen gestatten (Vergrößerung des Streuwinkels von 3° auf 7° , geändertes Eintrittsblendenrohr).

Nachdem sich herausgestellt hat, daß die Elektronentemperatur an ISAR I < 1000 eV beträgt, erscheint es auch möglich, die Ionentemperatur mit Vorwärtsstreuung unter 3° zu bestimmen. Vorbereitungen dazu werden in die Wege geleitet, wie Eintrittsblendenrohr, konisches Rohrende am Entladungsgefäß, geeignetes Spaltpaket für den Monochromator.

4.1.2 90° -Streuexperiment an ISAR I

Das Experiment wurde so aufgebaut, daß der Laserstrahl exzentrisch durch das Entladungsgefäß gesandt werden konnte, um auch bei späteren Zeitpunkten das stark driftende Plasma zu treffen. Es wurden keine Blenden am Ein- und Austrittsende des Entladungsrohres verwendet. Um das dadurch auftretende höhere Falschlicht zu vermindern, wurde das zu untersuchende Licht an 2 Interferenzfiltern unter dem Brewsterwinkel reflektiert. Die Filter waren so bemessen, daß die unverschobene Laserwellenlänge (das Falschlicht) durchgelassen wurde. Auf diese Weise konnte der Falschlichtanteil auf $1/300 - 1/400$ herabgesetzt werden.

Die ersten Messungen lieferten Spektren, aus denen Elektronentemperaturen zwischen 300 und 500 eV (entsprechend den Batterieenergien 1,5 - 2,7 MJ) entnommen werden konnten. Die gleichzeitig durchgeführten Röntgenabsorptionsmessungen ergaben durchweg 1,5 bis 2 mal so hohe Werte. Die gemessenen Spektren waren nicht gut reproduzierbar, was zum Großteil auf zu geringe Streulichtintensität zurückzuführen ist. Wegen Umbau von ISAR I wurden die Messungen im Juli unterbrochen.

4.1.3 90° -Streuung an einem 7,5 kJ Theta-Pinch zur Untersuchung der Ionen- und Satellitenlinien

An einem dichten, sehr kalten Plasma wurden erste Ionenspektren unter 90° gemessen. Die Ionentemperaturen lagen zwischen 2 und 5 eV, die Dichten zwischen 3 und $10 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Diese Werte sind jedoch noch unsicher, da die Streuintensität zu gering war. Auch hier wurden die Fotomultiplier auf tangentialen Einfall umgebaut.

Die Satellitenlinie wurde im Falle der kleinsten Elektronendichte nachgewiesen und ihre Lage bestimmt.

Außer den Vorbereitungen einer exakten Messung des Ionenprofils sind noch Maßnahmen zur gleichzeitigen Messung der integralen Streuintensität der Ionen- und Satellitenlinie getroffen worden.

4.1.4 Verbesserung des Detektorsystems für die 90° -Streuung

Folgende Maßnahmen wurden getroffen:

- a) die Fotomultiplierkathoden werden nicht mehr senkrecht, sondern tangential beleuchtet. Gewinn an Quantenausbeute Faktor 3-5;
- b) die Höhe der Spalte im Monochromator wurde verdreifacht;
- c) der Monochromator wurde für 20 Spalten ausgelegt, so daß das ganze Spektrum aufgenommen werden kann (gegenüber 8 Spalten wie bisher);
- d) um möglichst viel nutzbares Streulicht aus dem Plasma herauszubekommen, wurde eine Rechnung durchgeführt, die die günstigsten Linsendaten bei gegebener Geometrie liefert (Rechnung ist auch für andere Streuexperimente brauchbar);
- e) um bei jeder Entladung eine Eichung der Streuanordnung zu ermöglichen, wurde eine spezielle Lichtquelle entwickelt. Sie liefert im gewünschten Spektralbereich einen Lichtimpuls, der dem zeitlichen Verlauf des Laserimpulses weitgehend gleicht (Halbwertsbreite 10 - 11 nsec). Als Steuerelement wird eine Kerrzelle benutzt, die mit Hilfe einer geeigneten Kabelschaltung für die gewünschte Zeit geöffnet wird. Der Eichimpuls wird in den Strahlengang eingeblendet und etwa 100 nsec nach dem Meßimpuls auf dem Oszillographen registriert.

f) Elektronik

Bei Vielkanalmessungen in der bisher üblichen Technik wird pro Kanal eine Oszillographenspur benötigt. Für die Messung ist jedoch nur ein kurzer Zeitabschnitt von Interesse, insbesondere z.B. die Amplitude des Streusignals. Es wurde daher in Zusammenarbeit mit Herrn Ulrich und Herrn Seidel folgende Verbesserung vorgeschlagen und teilweise getestet: Aus dem Signalverlauf wird elektronisch ein Zeitabschnitt der Größenordnung 300 nsec ausgeblendet. Diese Signale der einzelnen Fotomultiplier werden verschieden verzögert und dann addiert. Auf diese Weise sollen etwa 5 verschiedene Streusignale auf eine Oszillographenspur geschrieben werden. Die ersten Messungen mit den hierzu benötigten Torschaltungen, Verzögerungselementen und Addierstufen lassen das Verfahren als aussichtsreich erscheinen.

4.2 Messung von Magnetfeldern mit Hilfe des Faraday-Effekts (E. Glock)

Zur Bestimmung des Magnetfelds im Theta-Pinch Plasma soll die Drehung der Polarisations Ebene eines Gaslaserstrahls gemessen werden, die aufgrund des Faraday-Effekts bei Durchstrahlung des Plasmas in Feldrichtung auftritt.

Es wurde eine Testanordnung aufgebaut, in der das Verhalten des Plasmas hinsichtlich der Faraday-Drehung durch die Verwendung eines Glaskörpers im gepulsten Magnetfeld simuliert wurde. Die bei einer Kurzzeitmessung notwendige Übersetzung der Drehwinkelmessung in eine Intensitätsmessung erfolgte nach einem Differenzverfahren. Das aus dem Plasma austretende Laserlicht wird in 2 Lichtströme geteilt und tritt durch 2 Analysatoren, die um entgegengesetzt gleiche Winkel gegen die Polarisationsrichtung des Primärstrahls verdreht sind. Gemessen wird die Differenz der Signale in den beiden Kanälen. Die bisherigen Messungen an der Testanordnung ergeben eine Nachweisgrenze von ca. 15 kG unter Annahme eines Plasmas von 1 m Länge bei $n_e = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Der kleinste meßbare Drehwinkel wird durch die Qualität der Analysatoren, das Rauschen der Fotovervielfacher und den nichtlinear polarisierten Anteil des Lichts im Meßstrahlengang bestimmt.

Der unpolarisierte Anteil entsteht durch Streuung an den Glasflächen, durch lineare Doppelbrechung in thermisch verspannten Glaskörpern und durch die Halbspiegel der Strahlteiler. Er kann wesentlich über der ungestörten Meßgröße liegen. Verbesserungen durch Benutzung von Quarz anstelle von Glas werden erprobt.

4.3 Absolute Strahlungsmessungen im Vakuum-UV (R. Wunderlich)

Zur Absolutbestimmung von Strahlungsintensitäten aus schnell veränderlichen, hochenergetischen Plasmen wird für den Normal-Incidence-Bereich ein Meßverfahren vorbereitet. Dabei findet ein Detektor nach Lincke und Wilkerson ¹⁾ Verwendung, dessen Nachweisempfindlichkeit für Wellenlängen $\lambda < 1500 \text{ \AA}$ praktisch zeitunabhängig sein sollte. Für die Absolut Eichung dieses Detektors wird das "Branching-Ratio" Verfahren, für die Bestimmung der Strahlungsverluste innerhalb des Monochromators die Methode von Elton et al. ²⁾ eingesetzt.

4.4 Absolute Strahldichtemessungen im Vakuum-UV-Bereich (M. Kaufmann)

Die bereits im Vorjahr begonnene Messung der Strahldichte eines dichten z-Pinches im Vakuum-UV-Bereich wurde fortgesetzt. Die Strahlung wurde durch den Photoeffekt an einer Platinkathode zeitlich aufgelöst gemessen. Das Einschalten von Absorptionsstrecken aus einigen Edelgasen verschiedenen Drucks zwischen Entladung und Kathode gestattet es, Aussagen über die spektrale Zusammensetzung der Strahlung zu machen. Um die in diese Messungen eingehende, nur mangelhaft bekannte Quantenausbeute der Kathode zu eliminieren, wurde durch eine zweite Messung versucht, die Strahlung absolut zu messen. Dazu wurde unter Beibehaltung der Geometrie die Photozelle durch eine Thermosäule ersetzt. Nach Entwicklung eines geeigneten Verstärkers wurde es möglich, die VUV-Strahlung zeitintegriert absolut zu messen. Die Kombination beider Messungen liefert die Strahldichte im VUV-Bereich zeitlich aufgelöst, absolut und in gewissen Grenzen spektral zerlegt.

Es ist beabsichtigt, absolute Strahlungsmessungen an heißen Pinch-Plasmen durchzuführen.

4.5 Die Untersuchung über die Infrarotemission eines Plasmas (D. Gross) wurde abgeschlossen [25]. Eine Veröffentlichung ist in Vorbereitung.

4.6 Die Entwicklung von piezoelektrischen Drucksonden (W. Katsaros) wurde weitergeführt (IPP 1/46). Über Messungen mit den Sonden am Antipinch wurde berichtet [18].

4.7 Weiterentwicklung einer gepulsten Neutronenquelle (H.-J. Schneider-Muntau)

Die Arbeiten an der Neutronenquelle wurden abgeschlossen. Durch geeignete Konstruktion des Entladungsgefäßes konnte die Ionisierungswahrscheinlichkeit in der Hohlanode durch Elektronen- und Ionenstoß vergrößert und durch kleineren Elektrodenabstand die Umladung verringert werden. Es ergab sich eine druckabhängige Steigerung der Neutronenausbeute um das 16 bis 40-fache (auf die gespeicherte Energie bezogen) gegenüber dem früheren Experiment ³⁾. Eine Erhöhung der Entladespannung von 110 kV auf 180 kV ließ die Neutronenemission um einen weiteren Faktor 4 ansteigen, so daß Raten bis zu $5 \cdot 10^{12}$ Neutronen/s der $D(d,n) \text{ He}^3$ -Reaktionen

1) R. Lincke und T.D. Wilkerson, Rev. Sci. Instr. 33, 911 (1962)

2) R.C. Elton, E. Hintz und M. Swartz, VIIth Int. Conf. on Phen in Ionized Gases, Beograd 1965

3) B. Kronast, Z.f. Physik 15, 377 (1963)

bei Halbwertsbreiten von 30 - 100 ns erreicht werden konnten. Anhang der verfügbaren Wirkungsquerschnitte für Stöße von Elektronen, schnellen Deuteriumionen und Neutralteilchen mit D_2 -Molekülen konnte eine Vorstellung von der Ionenbildung und ihrem Einfluß auf die Neutronenausbeute gewonnen werden. Abschätzungen im Rahmen dieser Modellvorstellung ergaben eine befriedigende Erklärung der Neutronenausbeutesteigerung.

4.8 Elektronische und optische Entwicklungen (E. Glock, F. Lindenberger)

Zur Prüfung des Kurzzeitverhaltens von Multipliern wurde eine Lichtquelle entwickelt. Durch Kombination von Drehspiegel, Hohlriegelspalten und hoch korrigierter Optik mit einer geeichten Wolframbandlampe können Lichtimpulse mit einer Anstiegszeit $T \approx 10$ nsec, mit wählbarer Impulsdauer bis zu $1000 \cdot T$ und mit wählbarer Formgebung des Impulsdaches erzeugt werden. Mit der Anordnung kann in einer Messung die Linearität des Multipliers ermittelt und das Rauschen bei der jeweiligen Versorgungsspannung qualitativ ermittelt werden.

Für die Messung von Lichtsignalen stark wechselnder Intensität ist es wünschenswert, die Multipliierversorgung zu tasten. Dazu wurde ein Impulsgenerator mit Impulsanstieg von 100 ns und $R_1 = 10 \Omega$ entwickelt.

Weitere Entwicklungen sind: ein Signalgenerator zur Nachtriggerung aller Funkenstrecken einer Batterie bei der Fehlzündung einzelner Kreise. Ein Neutronenzähler mit Vorverstärkern bei dem wahlweise 1 - 6 Zählrohre einschaltbar sind. Eine Anordnung zum periodischen Schalten (10 Hz) im Nanovoltbereich mittels eines impulsgeheizten Hg-Relais u.a.m.

Zu interferometrischen Messungen an langen Theta-Pinchen wurde ein Mach-Zehnder Interferometer mit einzeln aufgestellten Spiegeln (ohne Rahmenverbindung) und 120° Ablenkwinkel gebaut und ein Justierverfahren ausgearbeitet. Die Gebäudeschwingungen konnten in den Trägersäulen hinreichend gedämpft werden. Das Mach-Zehnder Interferometer gestattet die Erzeugung eines auswertbaren Streifensystems mit der Kohärenzlänge eines Laserimpulses.

1. Toroidale Einschließung - WENDELSTEIN

(E. Berkl, D. Eckhartt, G. v. Gierke, G. Grieger, F.W. Hofmann⁺), S. Miyoshi⁺⁺),
 W. Ohlendorf, F. Rau, A. Roland⁺⁺⁺), H. Wobig, R. Young⁺)
 (Ingenieure: K. Freudenberger, J. Kolos, M. Zippe)

1.1 Übersicht

In früheren Experimenten [16] mit Cäsiumplasmen konnte gezeigt werden, daß sowohl in einem Stellarator mit helikalen Windungen des Typs $\ell = 2$ als auch in einer Oktopol-Anordnung Teilchenverluste auftreten, die kleiner sind als die auf Grund von Bohm-Diffusion zu erwartenden. Darüber hinaus waren diese Verluste mit "klassischen" Annahmen berechenbar und fast ausschließlich durch Rekombination an materiellen Oberflächen, die in das Plasma hineintragten, hervorgerufen. Das Bestreben im Berichtsjahr war daher, diese Rekombinationsverluste so weit herabzudrücken, daß eine quantitative Aussage über den Teilchentransport quer zum Magnetfeld möglich wird. Im Stellarator Wendelstein Ib konnte dieses Ziel erreicht werden [4, IPP 2/52], wenn auch die Meßmethodik für endgültige Aussagen noch verfeinert werden muß. Leider trat durch den Umzug der Experimente vom Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik in München in das Institut für Plasmaphysik eine schwerwiegende Unterbrechung ein, die die Wiederaufnahme der Experimente auch im neuen Jahr noch einige Zeit hinauszögern wird. Mit dem Wiederaufbau werden jedoch gleichzeitig die Energieversorgung und die Experimentiermöglichkeiten wesentlich verbessert. Eine Reihe von Hilfsexperimenten wurde während der Umzugsperiode vorbereitet.

1.2 Wendelstein W Ib (Stellarator mit helischen Windungen vom Typ $\ell = 2$)

Gegenüber den im letzten Jahrebericht erwähnten Experimenten wurden folgende Änderungen durchgeführt:

- a) Die Transformatorenkerne für Ohmsche Heizung wurden entfernt. Die experimentellen Resultate sind jetzt unabhängig von der Umkehr des Magnetfeldes.
- b) Anstelle der direkt geheizten Spirale, deren Halterung die oben erwähnten Oberflächen-Rekombinationsverluste verursachte, wurde das Cäsiumplasma durch Kontaktionisation an einer Tantal-Kugel von 5 mm Durchmesser erzeugt. Die Kugel hing an einem dünnen Wolfram-Draht von 25 μm Durchmesser. Geheizt wurde sie durch einen Elektronenstrahl mit einer Energie bis zu 9 kV und einer Stromstärke bis zu 100 mA. Vor Einschalten des Magnetfeldes wurde der Elektronenstrahl abgeschaltet. Die Wärmekapazität der Kugel war groß genug, um über 3 sec eine Elektronenschicht und damit einen konstanten Ionenfluß zu garantieren.
- c) Um die Rekombination an den Sonden ebenfalls zu verkleinern, wurden - anstelle der früher benutzten Doppel-Doppelsonden - Zylindersonden mit 50 μm Durchmesser, 5 mm effektiver Länge und einer 10 μm dicken Glasisolation benutzt. Mit diesen Sonden konnte verlässlich nur gemessen werden, wenn Sonde und Emitterkugel auf gleichen Magnetfeldlinien

⁺) Gast aus USA, ⁺⁺) Gast aus Japan, ⁺⁺⁺) Gast aus Frankreich

standen. Kugel und Sonde bildeten dann eine Doppelsonde; das ganze System wurde auf Floating Potential gehalten. Mit zwei dieser Sonden konnte der axiale Dichteabfall von der Emittierfläche zur gegenüberliegenden Seite gemessen werden.

d) Eine ringförmige Doppel-Doppelsonde bestimmte auf der dem Emitter gegenüberliegenden Maschinenseite die Apertur des Plasmas und erlaubte, den Fluß der Teilchen zu messen, die über die Apertur hindurchdiffundierten und entlang den Magnetfeldlinien auf diese Sonde liefen.

Mit den beiden Zylindersonden wurde der axiale Dichteabfall auf der Achse des Stellarators bestimmt. Dieses Meßverfahren ist unabhängig von den Sondereigenschaften und dem Absolutwert der Dichte, vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen längs der Achse nicht zu stark variiert. Bei sorgfältiger Einstellung aller Parameter und nach Korrektur für die etwas unterschiedliche Größe der Sondenoberflächen ergab sich mit geringem statistischem Fehler ein Abfall um ca. 7 %.

Dieses Resultat ist mit plausiblen Annahmen über die erwähnte Geschwindigkeitsverteilung nur mit einer wesentlich kleineren radialen Diffusion als sie den üblichen "pump-out"-Verlusten entspricht, zu erklären.

Auch der Zusammenhang zwischen der Dichte auf der Achse, n_0 , und dem mit der Ringsonde gemessenen Teilchenfluß Φ ist mit der Annahme von Bohm-Diffusion nicht verträglich und folgt vielmehr der aus der Annahme von Widerstandsdiffusion folgenden Beziehung $n_0 \propto \sqrt{\Phi}$.

Die Abhängigkeit des aus diesem Zusammenhang bestimmten Diffusionskoeffizienten folgt innerhalb der experimentellen Grenzen dem aus der Stellarator-Theorie bekannten Gesetz $D_{\perp} \propto \frac{4\pi^2}{L^2}$, sobald der Rotations-Transformationswinkel L eine minimale Größe überschritten hat.

Die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten vom Betrag des Magnetfeldes bei festgehaltener Geometrie konnte noch nicht geprüft werden.

Diese Resultate wurden nur dann gefunden, wenn 2 Voraussetzungen erfüllt waren.

1) Die Temperatur der Emittierkugel mußte zwischen 1800 und 2200 °K betragen. Für kleinere oder höhere Temperaturen stieg das Verhältnis Φ/n_0^2 stark an verglichen mit seinem Wert innerhalb des oben zitierten Temperaturbereichs.

2) Die Lage der Emittierkugel im Magnetfeld war vorgeschrieben, vermutlich mußte die Emittierkugel auf oder zumindest nahe der magnetischen Achse stehen. Diese beiden experimentellen Befunde legen die Vermutung nahe, daß die Möglichkeit zur Thermalisierung des Plasmas eine wichtige Voraussetzung für unsere Ergebnisse ist.

Die Versuche müssen, sobald die Energieversorgung fertiggestellt ist, mit genaueren und besseren Meßmethoden wiederholt werden, um Aufklärung der Diskrepanz gegenüber den abweichenden Resultaten von Princeton zu erhalten. Insbesondere sollen direkte Messung der Plasmazerfallszeiten durch Abschalten des Neutralstrahls und weniger der Kritik ausgesetzte Dichtemessungen versucht werden.

1.3 W II

Die oben angeführten Versuche über den Mechanismus der Diffusion quer zum Magnetfeld sollen im Stellarator W II (14 cm Rohrdurchmesser an der engsten Stelle, $B_{\max} = 17 \text{ kG}$) wiederholt werden. W II ist ein Kreistorus (ohne gerade Zwischenstücke!). Die helischen Windungen sind vom Typ $\ell = 2$ und das resultierende Magnetfeld hat eine fünfzählige Drehsymmetrie um die Torusachse. Damit hat das Magnetfeld die für ein Stellaratorfeld höchstmögliche Symmetrie und man vermeidet die gegen Störfelder empfindlichen "circularizer" (Übergangsbereiche zwischen den helischen Feldern in den Krümmern und dem homogenen Feld in den geraden Zwischenstücken); zudem ist es relativ leicht zu berechnen und erlaubt daher bessere Vergleiche zwischen Theorie und Experiment.

Diese Apparatur wird, aller Voraussicht nach, Mitte des Jahres 1967 einsatzbereit sein und - wegen ihrer im Vergleich zum W I größeren Dimensionen - dem Einsatz neuerer und besserer Diagnostikmethoden zugänglich sein.

1.4 W III

Die alte Apparatur W III ist unter dem Namen "BARBARA" an die Gruppe "Thermische Plasmen und Sondendiagnostik" (s. Punkt 2.) abgetreten worden. Da jedoch weiterhin viele diagnostische und technische Probleme unter einfacheren Bedingungen studiert und die in toroidalen Anordnungen erhaltenen experimentellen Ergebnisse mit den in linearer Geometrie gewonnenen verglichen werden müssen, wird aus von früheren Experimenten vorhandenen Bauelementen eine neue lineare Q-Maschine mit dem Namen W III aufgebaut. Diese Apparatur wird im Frühjahr 1967 einsatzbereit sein.

1.5 W IV

W IV ist eine Nachbildung des linearen Teils der Apparaturen W I. Zum Unterschied zu den üblichen Q-Maschinen wird die Apparatur mit kalten Endplatten betrieben. Das Plasma wird in der Mitte an einer heißen Spirale erzeugt und driftet im Magnetfeld nach beiden Seiten zu den Endplatten. Die Apparatur wurde zum Studium der Plasmaerzeugung in einem Magnetfeld benutzt, wobei quantitative Übereinstimmung zwischen der im Experiment gefundenen Reduktion der Plasmaerzeugung im Magnetfeld mit theoretischen Überlegungen auf Grund der Teilchenbahn im Magnetfeld erreicht wurde

Weitere Untersuchungen beschäftigten sich mit dem Einfluß eines radialen elektrischen Feldes auf das Gleichgewicht des Plasmas [IPP 2/46]. Während praktisch alle Ionen die Endplatten erreichten, wenn das angelegte elektrische Feld Null oder nach innen gerichtet war, wurde schon bei geringen nach außen gerichteten Feldern das Plasma aus dem Gleichgewicht gebracht, der Ionenstrom zu den Endplatten wurde reduziert und das Plasma zeigte ein offenbar turbulentes Verhalten. Die radiale Diffusion scheint dann qualitativ und unter gewissen Einschränkungen auch quantitativ dem Bohmschen Diffusionsgesetz zu folgen. Der Übergang zum "turbulenten" Zustand erfolgt, vermutlich als Folge einer durch die Zentrifugalkraft hervorgerufenen Instabilität, bei etwas kleineren radialen elektrischen Feldern, als sie zur Aufhebung des Gleichgewichts erforderlich sind. Die Amplitude des Frequenzspektrums des turbulenten Plasmas folgt dem von CHEN ¹⁾ vorausgesagten und auch schon von anderer Stelle in anderen Entladungen gefundenen $r^{-2,5}$ -Gesetz.

1) Phys. Rev. Letters, 15, 381 (1965)

1.6 W V (Oktopol)

Versuche, die Apparatur W V noch vor dem Umzug wieder in Betrieb zu nehmen, scheiterten an mehreren Kurzschlüssen in den Ringsystemen und ihren Stromführungen. Daher wurden jetzt Spulengehäuse aus gedrehten, der Feldkonfiguration angepaßten Formteilen angefertigt. Gleichzeitig sollen Bewegungen der Spule in ihrem Gehäuse (Beschädigung der Isolation) vermieden und die Zirkulation des Kühlwassers um die Spule verbessert werden. Auch diese Apparatur sollte bis Mitte 1967 wieder zur Verfügung stehen.

Neue Rechnungen von H. Grawe zu den im letzten Jahr gemessenen Profilen lassen die Möglichkeit offen, hier Diffusion durch Ionen-Ionenstöße zu beobachten. Diese Rechnungen werden fortgesetzt und sollen im kommenden Jahr in einem Bericht zusammengefaßt werden.

1.7 Neue Feldkonfigurationen

In dem bisher verwendeten Oktopol üben die stromführenden Ringe starke Kräfte aufeinander aus, die durch massive Stützen abgefangen werden müssen. Diese Stützen geben wiederum Anlaß zu hohen Plasmaverlusten durch Rekombination auf ihren Oberflächen. Neue Konfigurationen sollen diesen Nachteil verringern. Sie werden auf einem Analoggerät grob ermittelt und anschließend auf der IBM 7090 detailliert untersucht (gemeinsam mit K.U. v. Hagenow). Erste Studien zeigten, daß sich in einem Quadrupol mit koplanaren Ringleitern von "bananen"-förmigem Querschnitt durch vertretbare Stromstärken kein Magnetfeld aufbauen läßt, das in der Ebene $z = 0$ zwischen den Spulenkörpern stark genug wäre, um die Diffusionsraten des Plasmas auf die Leiter hinreichend zu reduzieren. Die Konfiguration "Interpol" mit einem gegenüber der vorhergehenden Anordnung zusätzlichen negativen Innenleiter vermeidet diesen Nachteil. Da jedoch ein Vergleich mit dem vorhandenen Oktopol zeigte, daß die stabilen Volumina etwa gleich groß und die theoretischen Plasmaverluste durch Diffusion bzw. durch Rekombination an den Stützen von gleicher Größenordnung sind, wurde dieses Projekt nicht weiter verfolgt.

1.8 Theorie

1.8.1 Teilchenbahnen im Quadrupolfeld

Unter Vernachlässigung der Toruskrümmung wurden Teilchenbahnen unter verschiedenen Anfangsbedingungen in einem von zwei parallelen Drähten erzeugten Magnetfeld numerisch berechnet. Es zeigte sich, daß - wie erwartet - um die Separatrix ein Gebiet existiert, in dem wegen der Nullstelle im Magnetfeld das magnetische Moment der Teilchen nicht erhalten bleibt.

Überlagert man senkrecht zum Hauptfeld ein homogenes Zusatzfeld, so zeigt sich erst dann ein Einfluß auf die Erhaltung des magnetischen Moments, wenn das Zusatzfeld vergleichbar mit dem Maximum des Hauptfeldes auf der Separatrix ist. Die numerischen Rechnungen wurden von H. Paretzke durchgeführt.

1.8.2 Nullpunktinstabilität im Quadrupolfeld

Ausgehend von der Vlasovgleichung wurde in einem von zwei Drähten erzeugten Magnetfeld die Instabilität vom "Spiegeltyp" ¹⁾ untersucht. Mit Hilfe der Theorie der Nachbargleich-

1) D. Pfirsch, Lab.-Bericht MPI/PA/3/62

gewichte ^{1) 2)} konnte ein kritisches β abgeleitet werden, oberhalb dessen die Umgebung des Nullpunkts instabil wird. Es ergab sich $\beta_c \approx r_0^2/R_0^2$, wobei r_0 ein Maß für die Dichteabfalllänge ist, $r_0 = n_0/|\nabla n_0|$ und $2R_0$ der Abstand der felderzeugenden Drähte. Die neutrale Störung (Nachbargleichgewicht) ist verwandt mit der "tearing-mode" eines ebenen Schichtpinches und beschreibt ein Aufbrechen und Sichneuverbinden der Feldlinien in der Nachbarschaft des Nullpunkts.

1.9 W VI

Völlig frei von den dem Plasma ausgesetzten Stützen ist ein aus supraleitenden, levitierten, stromführenden Ringen aufgebauter Quadrupol. Erste Studien über die physikalischen und technischen Möglichkeiten der Realisierung einer derartigen Konfiguration wurden aufgenommen.

1.10 Versorgungseinrichtungen

Der Umzug der Gruppe Wendelstein vom Max-Planck-Institut für Physik in München in das Institut für Plasmaphysik machte eine Neukonzeption der Starkstrom-Versorgungseinrichtungen erforderlich. Im IPP konnte - was im MPI aus Platzgründen nicht möglich war - ein zweiter Generator vom Typ HERTHA aufgestellt und beide Generatoren mit je zwei Antriebsmotoren versehen werden. Auf diese Weise entfällt die bisher benutzte komplizierte und störanfällige Schaltung, bei der die HERTHA-Maschine abwechselnd als Motor zum Speichern von Rotationsenergie und dann als Generator zur Erzeugung der Stellarator-Magnetfelder betrieben wurde. Die beiden Maschinensätze liefern 16 MW Impulsleistung oder 1,8 MW Dauerleistung, die später auf 3,2 MW erhöht werden kann. Fünf kleinere Generatoren stehen mit insgesamt 1 MW Impulsleistung oder 500 kW Dauerleistung für Korrekturfelder, diagnostische Hilfsmittel usw. zur Verfügung. Die Kühlwasseranlage wurde für 4 MW abzuführende Leistung ausgelegt.

1.11 Diagnostik

Die Problematik der Interpretation von Sondenmessungen im Magnetfeld einerseits und die stets vorhandenen Störungen des Plasmas durch die Anwesenheit der Sonde andererseits machen ein Abgehen von dieser einfach zu handhabenden Methode der Dichtemessung nötig. In Zukunft wird daher das Schwergewicht in der Diagnostik neben der Anwendung von Mikrowellen zur Bestimmung der Gesamtteilchenzahl in der Verwendung spektroskopischer Methoden liegen. Das bedeutet gleichzeitig, daß das Caesium-Plasma durch ein Barium-Plasma ersetzt wird. Erste, die Untersuchungen der Gruppe thermische Plasmen fortführende Experimente sind in der Apparatur W III in Vorbereitung. Die Wechselwirkung des Ba-Plasmas mit Re-Emittern ist theoretisch untersucht worden [IPP 2/47].

1.12 Technik

a) Die Erzeugung eines Lithium-Plasmas durch Kontaktionisierung an Iridium-Oberflächen wurde erprobt. Die gefundenen Ionenflüsse sind ausreichend für den Einsatz in toroidalen Maschinen. Hierüber liegt ein interner Institutsbericht vor (A. Roland, "Etude de l'ionisation du Lithium").

1) D. Pfirsch, MPI/PA/3/62

2) G. Laval et al., IAEA Proc. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Research, Culham 1965, Vol., II, 259 (Wien 1966).

- b) Die zur Erzeugung des spiralförmigen Emitters im Stellarator notwendigen Stromzuführungen führen zu einer starken Störung des Plasmas. Deshalb wurde dieser Emitter durch eine an einem dünnen Wolframdraht aufgehängte Kugel ersetzt, die jeweils zwischen den Experimenten durch einen auf ihre Oberfläche fokussierten hochenergetischen Elektronenstrahl geheizt wurde. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in einem internen Institutsbericht festgehalten (A. Roland, "Chauffage d'une Boule de Tantal par Bombardement Electronique").
- c) Um die Temperatur der Emitterkugel auch während der Zeitdauer des Experiments konstant zu halten, ist eine kontinuierlich arbeitende und mit dem Plasma nur unwesentlich wechselwirkende Heizmethode in Vorbereitung. Diese besteht in der optischen Abbildung eines Xenon-Hochdruckbogens auf die Kugeloberfläche.
- d) Um alle wichtigen Parameter für jedes Experiment auszudrücken, ist ein Daten-Erfassungs- und Speichersystem in der Entwicklung.

2. Thermische Plasmen

(F. Blau ⁺), A. Clinckemallie ⁺⁺), C.F. Dewey ⁺), E. Guillino, M. Hashmi, G. Müller, A.J. van der Houven van Oordt ⁺⁺), J.G. Wegrowe ⁺⁺)
(Ingenieure: M. Lipa, P. Müller)

2.1 Untersuchungen an Kontaktionsplasmen

Die bereits im Jahresbericht 1965 beschriebene neue Q-Maschine (ALMA III) wurde im Oktober des Jahres in Betrieb genommen. Sie besitzt ein homogenes Magnetfeld bis zu 13 kG. Durch weitere Verbesserung der Endplattenheizung wurde ein rotationssymmetrisches Temperaturprofil mit weniger als 25° Abfall vom Zentrum (2500 °K) zum Rand erreicht. Außerdem wurden die Atomstrahlöfen weiterentwickelt, so daß in Kürze die Atomstrahlen zur Achse justierbar sein werden und das Alkalireservoir bis zu 200 g aufnehmen kann. Die ebenfalls bereits im Jahresbericht 1965 beschriebene Q-Maschine ("BARBARA") war erst nach dem Umzug in der zweiten Hälfte des Berichtsjahres wieder betriebsbereit, da das Vakuumgefäß wegen eines Materialfehlers erneuert werden mußte. Zusätzlich wurden an dieser Apparatur einige technische Verbesserungen vorgenommen.

2.1.1 Geheizte Sonden (E. Guillino, M. Troppmann)

Das im Jahresbericht 1965 detaillierter beschriebene Experiment über den Einfluß der Temperatur einer Sondenspitze auf deren Stromspannungscharakteristik wurde abgeschlossen. Es konnte gezeigt werden, daß eine zu hoch gemessene Elektronentemperatur und eine Hysterisis der Charakteristik im wesentlichen auf Adsorptionsschichten auf der Sondenspitze zurückzuführen sind. Diese Meßfehler vermindern sich drastisch, wenn man die Sonde dauernd indirekt heizt.

2.1.2 Q-Maschine in "single-ended operation" (E. Guillino, M. Hashmi)

Die Rechnungen zur Anwendung der Bilanzgleichungen auf Nichtgleichgewichtsfälle wurden ausgedehnt auf die Q-Maschine mit einer kalten und gegen Plasmapotential vorgespannten Endplatte. Vergleichende Messungen an ALMA II und ALMA III ergaben gute Übereinstimmung. Wegen der in der Sondenmessung enthaltenen Unsicherheit wurden die Experimente mit Mikrowellen oder spektroskopischer Dichtemessung wiederholt.

⁺) Gast aus USA

⁺⁺) EURATOM

2.1.3 Ionenkühlung (F. Blau, E. Gullino, M. Hashmi in Zusammenarbeit mit N. D'Angelo, Res. Establishment Roskilde, Risø, Dänemark)

Die durch Einlaß eines Edelgases in die Q-Maschine erhöhte Stoßfrequenz zwischen Ionen und Neutralatomen führt zu einer Kühlung der Ionen bei gleichzeitig etwa konstant bleibender Elektronentemperatur. Erste experimentelle Ergebnisse [7] zeigen die Möglichkeit, die Ionentemperatur zu messen. Anregungsbedingungen von "resistive drift"-Wellen und Instabilitäten sowie Anregung, Fortpflanzung und Dämpfung von elektrostatischen Ionenwellen ($k \parallel B$) sollen untersucht werden.

2.1.4 Vergleich der Dichtemessungen mit Langmuir-Sonden, Resonanzfluoreszenzstreuung und Mikrowellen an "BARBARA" (M. Hashmi, A.J. van der Houven van Oordt, J.G. Wegrowe)

Der neue, sorgfältig durchgeführte Vergleich und die Überprüfung der früheren Messungen ¹⁾ ergaben, daß in "single-ended operation" die Resonanzstremethode Dichten liefert, die um einen Faktor zwei niedriger liegen als die mit Langmuir-Sonden bestimmten. Die Ergebnisse von Spektroskopie und Mikrowellenmessung stimmten bei den neuen Experimenten innerhalb der Fehlergrenzen überein.

2.1.5 Versuche zu folgenden Problemstellungen wurden durchgeführt:

- a) Vergleich der Dichtemessungen mit den erwähnten diagnostischen Methoden in "double-ended operation".
- b) Spektroskopische Untersuchung von Driftwellen.
- c) Ionenkühlung durch Einlaß eines Edelgases in "double-ended operation".
- d) Vergleich zwischen "double-ended"- und "single-ended operation".
- e) Störungsbereich einer Sonde.

2.1.6 ELSA-Cäsiumdiode, Elektronenstrahlsonde (W. Ott, M. Troppmann)

Die Versuche zur Messung der Potentialverteilung in der ebenen Diode mit nur einem Emitter wurden fortgesetzt und im Rahmen einer Doktorarbeit abgeschlossen [52, IPP 2/48]. Sie bestätigen, daß AUER's stoßfreie Theorie auf die Cs-Diode anwendbar ist [53].

Die stoßfreie Theorie der Potentialverteilungen in der Zwei-Emitter-Diode wurde aufgestellt und die dazugehörigen Experimente wurden begonnen. Geplant ist ferner die Klärung der Art der auftretenden Schwingungen und deren Einfluß auf die Strom-Spannungscharakteristik. Um ein besseres Auflösungsvermögen der Elektronenstrahlsonde zu erreichen, wurde ein nachvergrößerndes elektronenoptisches System entwickelt. Da hierfür eine elektrostatische Anordnung gewählt wurde, läßt sich das Vergrößerungssystem auch für Ionen gleicher Energie verwenden.

2.1.7 Ionenstrahlsonde (C.F. Dewey, Jr. ⁺), P. Müller, W. Ott, M. Troppmann)

Um die Potentialverteilungen in den Emitterschichten auch im Magnetfeld untersuchen zu können, ist eine Ionenstrahlsonde in Vorbereitung. Die Entwicklung der Cs-Ionenquelle wurde bereits begonnen und eine vorläufige Theorie aufgestellt, die das Verhalten der Ionenquelle beschreibt. Ein Vergleich zwischen dieser Theorie und dem Experiment wird angestrebt.

¹⁾D. Eckhartt, G. Grieger, M. Hashmi, F.W. Hofmann, A.J. van der Houven van Oordt, "Comparison of Density Measurements by Langmuir Probes with Densities Determined by Resonance Fluorescence in a Singly Ionized Barium Plasma", Proc. VIIIth Int. Conf. on Phen. in Ioniz. Gases, Belgrad 1965, Vol. III, 26 (1966)

⁺Gast von der University of Colorado, Boulder, Colorado, USA

2.1.8 Rechnungen zum Plasmazustand in Q-Maschinen (G. Müller)

Mit den Ansätzen der Gleichgewichts-Theorie wurden Dichte-Fluß-Bilanzen und Emittercharakteristiken für Q-Maschinen in geschlossener Form berechnet. Letztere können unter bestimmten Voraussetzungen als Sondencharakteristiken interpretiert werden, aus denen erkannt wird, daß Elektronentemperatur-Bestimmungen mit Langmuir-Sonden bei extremer Ionenschicht nicht mehr, bei geringer Ionen- bzw. Elektronenschicht nur bedingt möglich sind. Außerdem ist die Spannungsdifferenz zwischen Plasma und Floatingpotential keine Konstante und das Verhältnis von Elektronen- zu Ionensättigungsstrom kann den Langmuirschen Wert $\sqrt{\frac{m_+}{m_-}}$ weit über- und unterschreiten.

2.1.9 Zwei-Farben-Pyrometer (P. Müller, E. Guillino)

Zur Messung der Endplattentemperatur in den Q-Maschinen unabhängig vom Graufaktor der strahlenden Oberfläche wird ein Farbtemperaturmeßgerät gebaut, das den Quotienten der Intensitäten zweier Wellenlängenbereiche des einfallenden Lichts zu bestimmen gestattet. Durch einen Regelmechanismus wird das einfallende Licht so weit geschwächt, daß die Intensität des einen der beiden Wellenlängenbereiche immer konstant bleibt. Die Lichtintensität im zweiten Wellenlängenbereich ist dann ein Maß für den Quotienten der Intensitäten im einfallenden Licht. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist, daß die photoelektrischen Sensoren nur in einem kleinen Intensitätsbereich arbeiten müssen, obwohl die Intensität des vom Meßobjekt ausgehenden Lichts im interessierenden Temperaturintervall etwa um den Faktor 30 variiert. Die Entwicklung ist nahezu abgeschlossen. Ein Patent und ein Hilfsgebrauchsmuster wurden angemeldet.

2.2 Plasmawellen und Plasmaausstrahlung

2.2.1 Messungen zur Mikrowellenstrahlung aus dem Cs-Plasma einer Q-Maschine (G. Müller in Zusammenarbeit mit G. Landauer)

Die Messungen wurden an der Apparatur ALMA II im "single-ended"-Betrieb durchgeführt. Der zweite Emitter wurde durch eine Elektronenkanone ersetzt. In der Mitte der Apparatur wurden 3 cm- und 8 mm-Wellenleiter radial eingeführt. Als Empfänger wurde ein Dicke-Radiometer benutzt. Trotz Variationen der Dichte und Schichtbedingungen am Emitter sowohl Anlegen von axialen Spannungen an die Plasmasäule konnte mit und ohne Einschub hochenergetischer Elektronen (bis 2 kV) in die Plasmasäule bisher keine Strahlung empfangen werden. Die Experimente sollen mit konstruktiven Verbesserungen an der Apparatur wiederholt werden.

2.2.2 Messungen zur Mikrowellenausstrahlung eines Elektronenstrahl-Plasmas (G. Müller in Zusammenarbeit mit G. Landauer)

Das Strahl-Plasma-Experiment wurde ebenfalls in der Apparatur ALMA II durchgeführt. An Stelle der Cs-Plasmasäule wurde He in die Apparatur eingelassen und der Elektronenstrahl (bis 2 kV und 0,2 A) eingeschossen. In einer Querschnittsebene in der Mitte der Apparatur wurden x-Band-Wellenleiter und Sonden radial eingeführt.

Nur in Gegenwart einer Sonde im Strahl-Plasma konnte eine intensive Ausstrahlung bei den Harmonischen der Elektronenzyklotronfrequenz $n\omega_e$ und der halben Zyklotronfrequenz $n\omega_e/2$ gefunden werden.

Das Strahlungsspektrum $\omega = n\omega_e$ wurde nur bei relativ hohen Gasdrücken $p_{\text{He}} \geq 10^{-4}$ Torr und nur, solange die Elektronenkanone außerhalb des homogenen Magnetfeldes lag, gefunden.

Bei Gasdrücken $p_{\text{He}} < 10^{-4}$ Torr und nur, solange die Elektronenkanone im homogenen Magnetfeld lag, wurden Strahlungsspektren mit Frequenzen $\omega = n\omega_e/2$ gemessen.

Diese Spektren wurden bis zum Restgasdruck in der Apparatur von ca. 10^{-6} Torr beobachtet. Sie gingen in ein Kontinuum über bei Heliumgasdrücken $p_{\text{He}} \geq 10^{-4}$ Torr.

Die Intensität der Ausstrahlung beider Spektren in Abhängigkeit von der Position der Sonde, der Sondengeometrie, der Sondenvorspannung, von Gasdruck, Spannung und Strom des Elektronenstrahls und die Polarisierung der Strahlung wurden ausführlich untersucht. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen konnte auf mögliche Strahlungsmechanismen geschlossen werden. [48, 49, IPP 2/53 - 3/46].

2.2.3 Untersuchung elektrostatischer Elektronenwellen im Plasma (A. Clinckemahl)

In der Plasmasäule einer Niederdruckentladung in Argon wurden bei homogenem Längsmagnetfeld HF-Transmissionsmessungen zwischen elektrischen Sonden durchgeführt. Die Sonden sind radial und axial beweglich. Dadurch ist es möglich, die Transmission bei beliebigem Winkel zu den Magnetfeldlinien zu messen. Besonders untersucht wurde die Ausbreitung elektrostatischer Plasmawellen parallel und senkrecht zum B-Feld.

Die Dispersionsbeziehung für Bernstein-Wellen ($\vec{k} = \vec{k}_\perp$) ließ sich für diskrete Werte: $\omega/\omega_{ce} = n + 1/2$ (für $n = 1, 2, 3 \dots$) exakt lösen. Wellenlänge-Messungen bei zwei Werten von $\omega/\omega_{ce} = n + 1/2$ (z.B. $n = 1$ und $n = 2$) ergeben eine sehr genaue Bestimmung der Elektronentemperatur und der Plasmadichte. Auf diese Weise wurden Temperatur und Dichte gemessen.

Weitere Messungen zeigten die Ausbreitungsmöglichkeiten allgemeiner Bernstein-Moden ($\vec{k} = \vec{k}_\perp + \vec{k}_\parallel$) in einem schmalen Frequenzbereich unterhalb zweiter Harmonischen von ω_{ce} .

Außerdem wurde die Ausbreitung longitudinaler Plasmawellen ($\vec{k} = \vec{k}_\parallel$) parallel zur Plasmasäule im Frequenzbereich $\omega_{pe} \leq \omega \leq \omega_{ce}$ gemessen. Diese Wellen sind besonders dichteabhängig und stark gedämpft.

2.3 Untersuchung einer elektrostatisch eingeschnürten Hg-Niederdruckentladung mit Langmuir-Sonden (M. Troppmann)

Die Untersuchungen zur Energieverteilung der Elektronen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit abgeschlossen und darüber ein Vortrag gehalten [69].

2.4 Hochfrequenzresonanzsonde (G. Peter)

Die Versuche zur Hochfrequenzresonanzsonde wurden abgeschlossen. Die Ergebnisse liegen als Dissertation [54] und als Laborbericht [IPP 2/54] vor.

3. Ambipolare Diffusion

(K.H. Geissler, T. Dodo +)

Die Messungen in einem abklingenden Heliumplasma bei Neutralgasdrucken zwischen 0,01 und 0,1 Torr wurden abgeschlossen. Die Magnetfelder variierten zwischen 160 und 2600 Gauss. Die axiale und radiale Stromverteilung zu einem segmentierten metallischen Zylinder wurden gemessen. Eine quantitative Analyse der Zerfallszeiten zeigte keine Anzeichen des Simonschen Kurzschlußeffektes. Bei höheren Magnetfeldern können die Ergebnisse mit einem um den Faktor 2,2 erhöhten Diffusionskoeffizienten nach Bohm beschrieben werden [23], [IPP 2/50, IPP 2/51].

Im weiteren Verlauf des Experiments wurde das Plasma durch nichtleitende Glaswände begrenzt und es ergab sich ein viel kleinerer nichtklassischer Beitrag zum klassischen Stoßdiffusionskoeffizienten. Schließlich wurde auch die Aufbauphysik des Plasmas in die Untersuchungen einbezogen (T. Dodo).

4. Ionenzyklotronwellen (SELENE I)

(G. Cattanei ++), G. Siller, K. Weinhardt)

(Ingenieure: R. Griek, D. Jacobi)

Bei dem Experiment werden die Erzeugung, Ausbreitung und Absorption von Ionenzyklotronwellen in einem Wasserstoffplasma untersucht. Der Mittelteil der Apparatur besteht aus einem 1 m langen Glaszylinder von 15 cm Innendurchmesser. Hier werden die Wellen in einem homogenen Magnetfeld durch einen Hochfrequenzsender mit Hilfe einer Stix-Spule erzeugt. Der HF-Sender mit einer Frequenz von 3 bis 6 MHz kann entweder im Dauerbetrieb (100 kW) oder im Impulsbetrieb (1,5 MW, 2 msec Pulslänge, 30 sec Pause) betrieben werden. Am Ort der Wellenerzeugung liegt die Senderkreisfrequenz ω knapp unterhalb der lokalen Ionengyrofrequenz ω_1 . Dies muß zur Erreichung eines guten Wirkungsgrades der Energieeinkopplung erfüllt sein. Wie die Skizze zeigt, laufen die Wellen von den beiden Spulenenden der erregenden Spule nach außen in einen Bereich abnehmenden Magnetfeldes (= magnetischer Beach) unter gleichzeitiger Abnahme der Wellenlänge λ und der Phasengeschwindigkeit. Für $\omega = \omega_1$ tritt mit der Näherung des kalten Plasmas Resonanz ein, d.h. $\lambda \rightarrow 0$. Die beiden sich nach außen hin an den magnetischen Beach anschließenden Magnetspiegel sollen eine Verminderung der Teilchenverluste in axialer Richtung bewirken. Das Plasma wird - nach einer Präionisation durch Mikrowellen oder durch einen Elektronenstrahl - mit demselben HF-Sender erzeugt, der auch die Wellen im Plasma anregt. Von besonderem Interesse sind vor allem das Verhalten der Ionenzyklotronwelle am magnetischen Beach, Reflexion und Transmission an der Resonanzstelle und Veränderung der Effektivität der Resonanzstelle für $p_{\perp} \gg p_{\parallel}$, wenn die Näherung des kalten Plasmas nicht mehr zutrifft, d.h. wenn die Phasengeschwindigkeit der Welle vergleichbar wird mit der thermischen Ionengeschwindigkeit. Außerdem sollen Harmonische der Ionenzyklotronwellen und auftretende Instabilitäten untersucht werden. Sollte es sich als notwendig erweisen, zur Unterdrückung einiger Instabilitäten eine kompliziertere Magnetfeldkonfiguration zu verwenden (z.B. ein Minimum-B-Feld), so ist auch eine Untersuchung der Wellenausbreitung in derartigen Feldern geplant.

Die oben beschriebene Apparatur wurde im Berichtsjahr geplant und aufgebaut. Mit dem Beginn der Experimente ist im März 1967 zu rechnen. Gleichlaufend mit diesem Programm wird ein Spektrometer zur Geschwindigkeits- und Massenanalyse der Ionen entwickelt. Ferner befindet sich in der Abteilung Technik ein Mikrowellensender mit folgenden Daten im Bau: Frequenz 15,7 GHz; Leistung 3 kW für 10 msec. Die Einspeisung dieser Mikrowellen ist an beiden Enden der Maschine an den zur Maschinenmitte gekehrten steilen Flanken der Magnetspiegel geplant.

+) Gast aus Japan ++) EURATOM

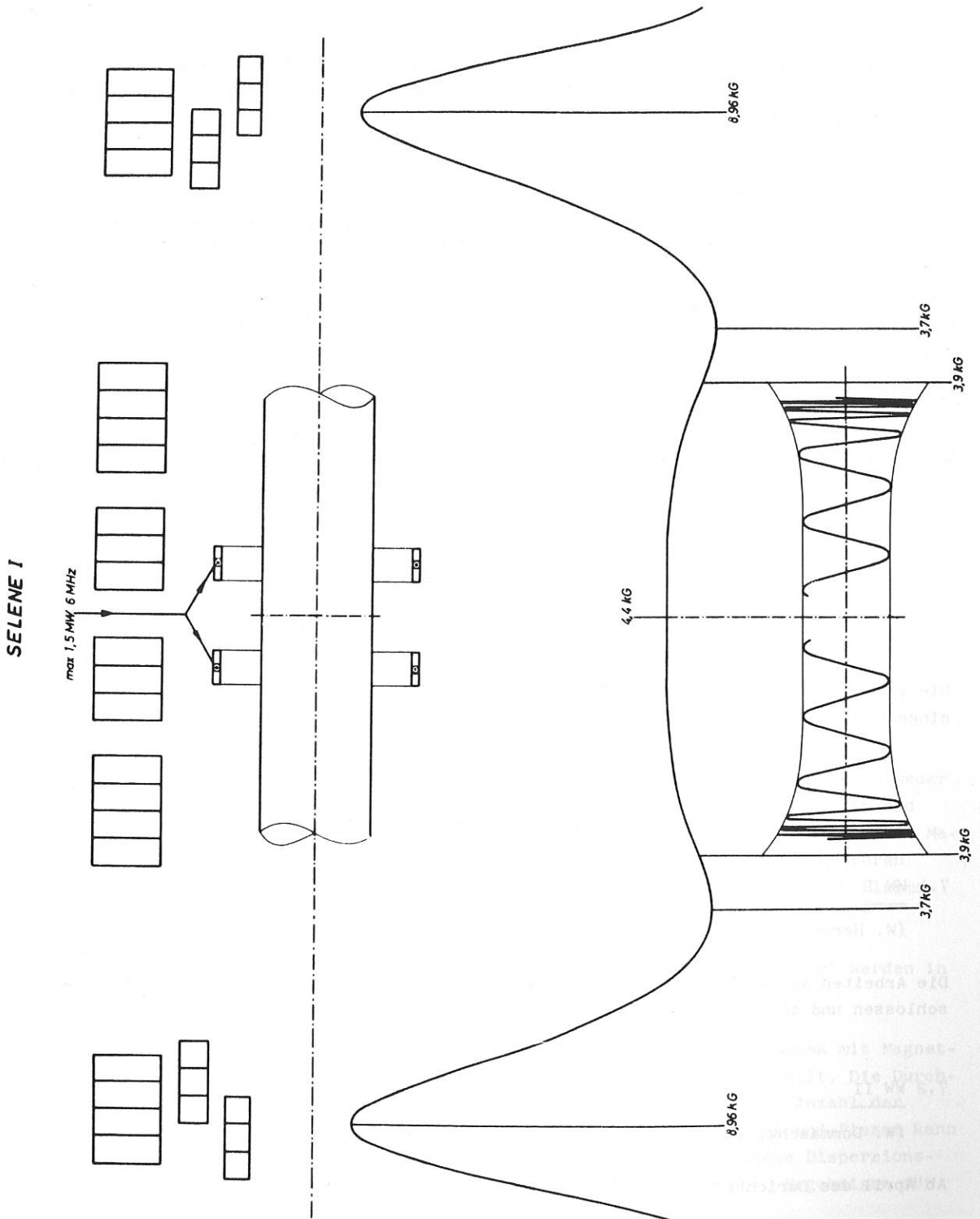


Abb. 6: Prinzipieller Aufbau des Experiments SELENE I

Hier ist die Bedingung für Elektronengyroresonanz erfüllt. Der Sender soll zwei Aufgaben erfüllen: Erstens soll damit eine bessere Prä- (oder eventuell sogar Voll-) Ionisation erreicht werden als mit den gegenwärtig vorhandenen Mikrowellen, die mit etwa 10 GHz im gegebenen Magnetfeld keine Elektronengyroresonanzstelle haben. Zweitens soll eine Anhebung der Elektronentemperatur erreicht werden, um einerseits einer zu raschen Abkühlung der aufgeheizten Ionen entgegenzuwirken und um andererseits auch die Möglichkeit zu haben, die Ausbreitung von Ionenzyklotronwellen in einem warmen Plasma zu studieren.

5. Elektronenzyklotronwellen in einem rotationssymmetrischen Plasma

K. Weinhardt

Der Argon-Hohlkathodenbogen (HOKE) wurde Mitte des Jahres stillgelegt, nachdem die 1965 begonnenen Untersuchungen über die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Richtung des achsenparallelen Magnetfeldes abgeschlossen werden konnten. Die Resultate werden in einem Laborbericht niedergelegt und demnächst auszugsweise in der Zeitschrift für Naturforschung veröffentlicht werden. Außerdem dienten sie als Grundlage einer von der Fakultät für Allgemeine Wissenschaften der Technischen Hochschule München genehmigten Dissertation [71].

6. Elektronengyroresonanz-Anregung

G. Lisitano, M. Michaelis
(Ingenieure: E. Rossetti, U. Weber)

Die Versuche wurden nach der Beurlaubung von Herrn Lisitano nach Princeton/USA vorläufig eingestellt. Teilergebnisse wurden als Diplomarbeit vorgelegt (M. Michaelis [IPP 2/49]).

7. Strahlplasma-Wechselwirkung

7.1 WW I

(W. Herrmann)

Die Arbeiten an der Apparatur WW I (Elektronenstrahlplasma-Wechselwirkung) wurden abgeschlossen und in einer Dissertation zusammengefaßt [27, 28].

7.2 WW II

(W. Dommaschk, W. Herrmann, Ingenieure: H.-B. Schilling, P. Ulbricht)

Ab April des Berichtsjahres wurden die Arbeiten an WW II wieder intensiviert.

7.2.1 Arbeiten am Strahlssystem

Die Absaugstrecke wurde weiterhin vereinfacht und verbessert. Die Absaugelektrode wurde über drei Stützisolatoren direkt auf der Ionenquelle angebracht und vor Inbetriebnahme

justiert. Schon bei relativ einfacher Justierung lief der Strahl immer sehr gut auf der optischen Achse. Die Justierung ist jetzt wesentlich einfacher, dafür ist allerdings die Spannungsfestigkeit auf maximal etwa 50 kV gesunken.

Eine bis 100 kV arbeitende Triode wurde in den Hochspannungskreis eingeschaltet. Diese Triode öffnet den Stromkreis automatisch in 10^{-6} sec, wenn ein bestimmter Strom überschritten wird. Auf diese Weise wird bei Überschlägen in der Saugstrecke sowohl die Saugelektrode als auch die Emissionsöffnung der Quelle wesentlich weniger belastet und so die Lebensdauer der Quelle erhöht. Auch ohne Triode hatte der Abschluß des Hochspannungskabels mit einem Wellenwiderstand von 50Ω zu einer Verlängerung der Überschlagsdauer und zu einer Verlängerung der Lebensdauer der Quelle geführt. Die Lebensdauer der Quelle wurde weiterhin erhöht durch Wahl von Ni-Einsätzen in der Emissionsöffnung und durch Anlegen eines negativen Potentials an die Saugelektrode. Durch diese Maßnahme konnte der Elektronenrückstrom zur Quelle reduziert werden.

Der maximal absaugbare und fokussierbare Strom konnte bei ca. 40 kV auf etwa 90 mA erhöht werden. Dazu war es nötig, die Spannung an der Quelle sehr langsam hochzufahren und zwar zunächst ohne Strahl innerhalb von etwa 4 Stunden auf etwa 70 kV, dann mit Strahl gleich langsam auf den gewünschten Wert. Wenn die Quelle nicht belüftet wird, kann bei weiteren Messungen die Spannung schnell zugeschaltet werden. Fast die Hälfte des Strahls von 90 mA bestand aus Protonen, ein reichliches Drittel aus H_2^+ , der Rest H_3^+ . Diese Zusammensetzung konnte in gewissen Grenzen durch geeignete Wahl der Quellenparameter geändert werden.

Um das Dichteprofil des Strahls ausmessen zu können, wurde ein Kalorimeter mit einer Meßfläche von 1 mm^2 entwickelt (G. Weber). Mit diesem Kalorimeter können Leistungen zwischen $4 \cdot 10^{-3}$ und etwa 100 Watt gemessen werden.

7.2.2 Strahlplasma-Wechselwirkung

In den meisten Experimenten wurde ein H_2^+ -Ionenstrahl verwendet. Der Strahl wurde entweder ohne Magnetfeld oder parallel zu einem Magnetfeld in Neutralgas (H_2) eingeschossen und die Wechselwirkung des Strahls mit dem von ihm selbst erzeugten Plasma untersucht. Mit Magnetfeld konnte von der Sonde nur ein rauschartiges Spektrum bei kleinen Temperaturen (bis ca. 50 MHz) aufgefangen werden, dessen obere Grenze scharf war und sich mit Plasmadichte und Magnetfeld verschob.

Ohne Magnetfeld konnte die Anregung von Elektronenplasmaschwingungen beobachtet werden in Übereinstimmung mit der Dispersionsgleichung. [29].

Um Bedingungen zu erhalten, unter denen die Anregung von Ionenwellen im Plasma mit Magnetfeld möglich ist, wurde eine möglichst genaue Dispersionsgleichung aufgestellt. Die Durchmesser von Strahl und Plasma sind endlich und können verschieden sein. Die Anzahl der Strahlen von gleichem Durchmesser ist beliebig. Jede Komponente von Strahl und Plasma kann eine Maxwellverteilung in der Richtung parallel zum Magnetfeld haben. Diese Dispersionsgleichung kann nur numerisch gelöst werden, und es wird zunächst versucht, Ergebnisse für einfache Bedingungen zu erhalten.

7.3 JOJO

(A. Borer)

Bei der Untersuchung der Wechselwirkung zwischen zwei Ionenstrahlen wurden Schwingungen mit der erwarteten halben Ionen-Zyklotronfrequenz gefunden. Die Schwingungen sind kohärent. Neben der Grundschiwingung konnten deren Harmonische bis hinauf zur achten festgestellt werden.

Das Zweistrahlensystem wird verwirklicht durch Paralleleinschuß eines Helium-Ionenstrahls in ein Magnetfeld und Reflexion des Strahls am Ende des Feldes. Die Energie des eingeschossenen Strahls beträgt einige 100 eV, der Strom einige μA . Die Dichte und die Energieverteilung, die sich im Entladungsgefäß nach mehrmaliger Reflexion der Teilchen am Beschleunigungs- und am Reflexionsgitter einstellen, müssen noch gemessen werden.

Aus der Dispersionsgleichung folgt, daß die Länge der angeregten Wellen ungefähr $1/3$ der Wechselwirkungsstrecke ist. Die Randbedingungen, und zwar nicht nur auf der radialen sondern auch auf der axialen Begrenzung, spielen daher eine wichtige Rolle. Ein theoretisches Modell, das diese berücksichtigt, soll ausgearbeitet werden.

8. Wandproblem

(E. W. Blauth)

8.1 Oberflächen

8.1.1 Festkörperzerstäubung

(R. Behrisch)

Im Berichtsjahr wurden eine Reihe von Streuexperimenten an Kupfer mit Protonenenergien bis 100 keV durchgeführt. Mit dem Halbleiterzähler konnte ein Auflösungsvermögen von < 7 keV bei einem theoretischen Wert von 5-6 keV für 100 keV Protonen erreicht werden. Beim Streuexperiment an Cu-Einkristallen zeigten sich die von LINDHARD theoretisch vorausgesagten Minima in den Richtungen dichtester Packung des Kristalls.

8.1.2 Feldemissionsuntersuchungen

(H. Vernickel, W. Hammer, B. Scherzer)

a) Im Feldelektronenmikroskop sollte das Ausheilen der beim Ionenbeschuß erzeugten Oberflächenfehler untersucht werden. Dazu wurden isochrone Ausheilkurven an Molybdänspitzen, die bei 90°C mit Ar-Ionen beschossen worden waren, aufgenommen. Es zeigt sich, daß die Fehler in einem weiten Temperaturbereich (von 90° - 800°K) ausheilen. Eingehendere Messungen werden noch durchgeführt (H. Vernickel).

b) Durch Variation der Spitzentemperatur bei gleichzeitigem Ionenbeschuß kann man untersuchen, ob die Targettemperatur einen Einfluß auf die Zerstäubung hat. Messungen an Wolfram bei Temperaturen zwischen 90° und 900°K zeigten sehr verschiedene FEM-Bilder bei verschiedenen Temperaturen und sonst konstanten Bedingungen. Die Ergebnisse lassen sich deuten, wenn man im Gegensatz zu bisherigen Anschauungen annimmt, daß nur einige Atomlagen bei der Zerstäubung beteiligt sind und fokussierende Stoßfolgen eine untergeordnete Rolle spielen (H. Vernickel). [70].

c) Ähnliche Untersuchungen wurden an Molybdän und Tantal mit analogen Ergebnissen durchgeführt (W. Hammer).

d) Die Apparatur zur Untersuchung der Desorption durch Ionenbeschuß wurde fertiggestellt (Fig. 7).

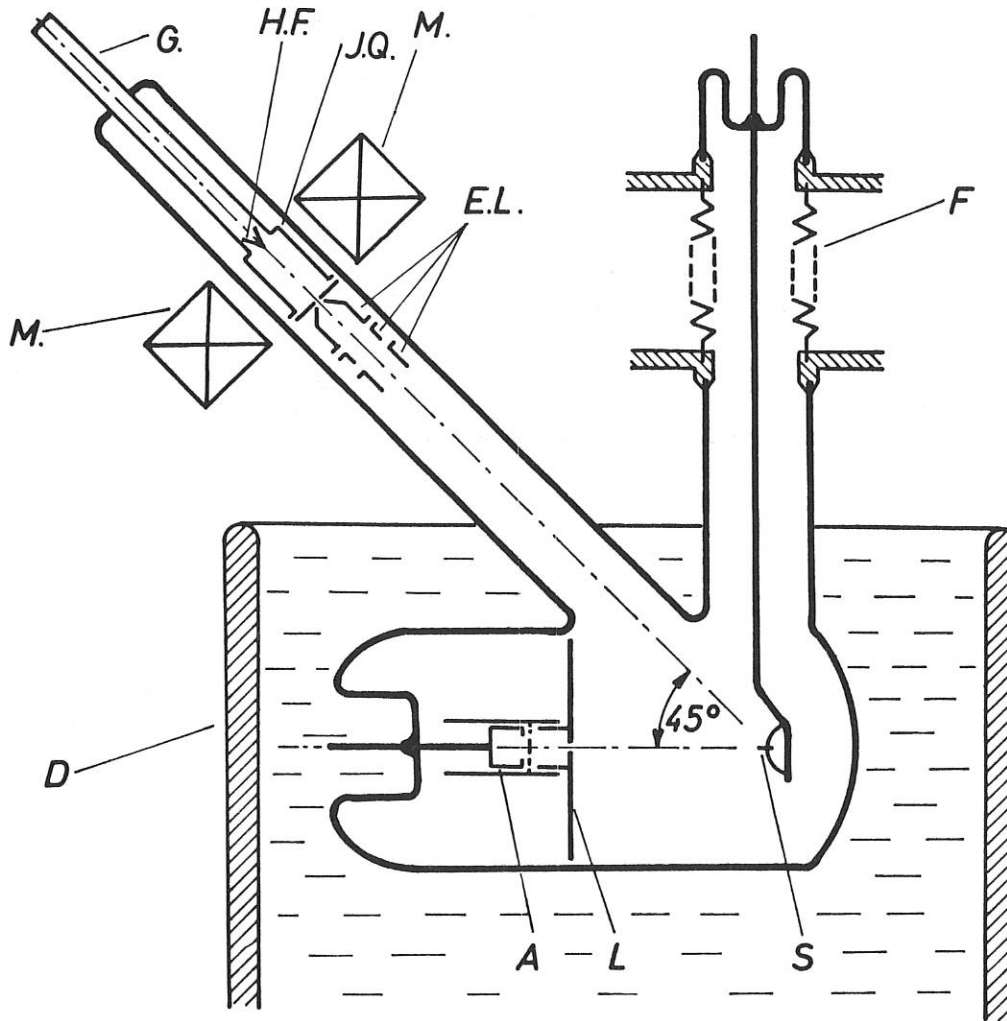


Abb. 7: Feldelektronenmikroskop zur Beobachtung der Desorption durch Ionenbeschuß.

S Justierbare Spitze, L Leuchtschirm, A Auffänger, I.Q. Ionenquelle, D Dewar mit fl.N₂

Die Ionenquelle liefert Ionen mit 50 bis 500 eV bei einer Stromdichte am Target von $2 \cdot 10^{-8}$ A/cm² (bei 100 eV) und $2,5 \cdot 10^{-7}$ A/cm² bei 500 eV für Ar-Ionen. Erste Messungen haben begonnen (B. Scherzer).

8.2 Massenspektrometer

(E.W. Blauth, E.H. Meyer)

Die Untersuchungen am Farvitron über die Beeinflussung der Signalhöhe einer Gasart durch andere Gase wurde beendet. Bei einer einzelnen Gasart wird das Absinken der Signalhöhe mit

wachsendem Druck durch die Raumladung im Ionenschwingungsraum verursacht. Die Steigung der Kurven: Signalthöhe als Funktion des Druckes ändert sich bei tiefen Drücken mit der Stärke des ionisierenden Elektronenstromes. Mit kleinerem Elektronenstrom könnten unter Umständen tiefere Drücke nachgewiesen werden. An einem Modell eines starkfokussierenden linearperiodischen Massenspektrometers konnte ein Farvitronbetrieb und ein Vierpolbetrieb erreicht werden. Ein kombinierter Betrieb war noch nicht möglich. Ein neues System wird mit hyperbelförmigen statt mit kreisförmigen Elektroden aufgebaut.

Im Berichtszeitraum erschien die Monographie "Dynamic Mass Spectrometers" [8].

8.3 Zweikammermanometer-Blearseffekt

(E.W. Blauth, G. Venus)

Es wurden 5 ZK-Manometer gebaut und ein Betriebsgerät für die Röhre entwickelt. Die Störungen der Ionenstrommessungen durch schwankende Anoden- und Kollektorspannungen konnten durch ein Kompensationsverfahren beseitigt werden. Der Blearseffekt wurde in der Literatur durch starke Abweichungen der Öldampfströmung von der Knudsenströmung erklärt. Unsere Messungen zeigen, daß diese Abweichungen nicht vorhanden sind. Die Hypothese von B. Scherzer, daß "Polymerisationssenken" den Blearseffekt verursachen, wird noch untersucht.

8.4 Restgase und Rückströmung in UHV-Systemen mit Öldiffusionspumpen

(H. Schulze)

Die rückströmenden Gase bestehen bei Octoil S als Treibmittel hauptsächlich aus CO_2 und H_2 . Bei DC 705 als Treibmittel waren die Hauptbestandteile Crackprodukte in der Form des Phenylrestes C_6H_5 .

Die Rückströmraten betragen:

$4 \cdot 10^{-9}$ Torr l/s bei Octoil S }
 $1,2 \cdot 10^{-11}$ " " bei DC 705 } bei einem Leitwert von 5 - 6 l/s.

Die rückströmenden Gase wurden bei $4,2^\circ$ bis 15°K durch Kondensation aufgefangen und nach dem Verdampfen analysiert. In keinem Fall war CO im rückströmenden Gas zu finden. Dieses bei UHV-Untersuchungen sehr störende Gas entsteht erst bei der Wechselwirkung der Restgase mit einem heißen Heizfaden.

EXPERIMENTELLE PLASMAPHYSIK 3 (PROF. DR. WIENECKE)

1. Stationäre Aufheizung von Plasmen hoher Dichte

(S. Witkowski, H. Wulff)

1.1 a) Wasserstoffbogen im Magnetfeld

(C. Mahn, H. Ringler, S. Witkowski)

Außer dem getrennt beschriebenen "langen Wasserstoffbogen" wurden drei Experimente betrieben:

- 1) "Lichtbogen im horizontalen Kessel" (ältestes Modell) mit den typischen Daten: 13 kG Magnetfeld und 1,8 kA Bogenstrom.
- 2) "Lichtbogen im senkrechten Kessel", 1965 in Betrieb genommen, mit den typischen Daten: 23 kG und 2,8 kA.
- 3) Zusätzlich wurde jetzt ein neuer "Sondenkessel" in Betrieb genommen, der eine Kammer zum Durchschlagen von Sonden besitzt, und dessen Bogenlänge außerdem durch Verschieben der Kathode variiert werden kann. Typische Daten für ihn sind: 30 kG Magnetfeld und 3 kA Bogenstrom.

Nachdem festgestellt wurde, daß bei größeren Werten von Bogenstrom und Magnetfeld ein großer Teil des Stromes nicht mehr in die dafür vorgesehene Ringanode eintritt, die sich noch im Bereich homogenen Magnetfeldes befindet, sondern vielmehr den Magnetfeldlinien folgend im divergierenden Bereich des Feldes am Absaugflansch aufgenommen wird, wurde die Konstruktion am "senkrechten" und "Sondenkessel" geändert: Ein Teil des Absaugflansches wurde, mit verbesserter Wasserkühlung, als zweite Anode ausgebildet, die mit der ursprünglichen, jetzt "erste Anode" genannten, auf gleichem Potential liegt. Durch zwei zusätzliche Magnetfeldspulen wurde dafür gesorgt, daß der Strom in einem definierten Bereich der "zweiten Anode" aufgefangen wird, siehe Abb. 8.

In diesem Zusammenhang wurde auch die "Pumpwirkung" des Bogens geklärt, die bereits früher beobachtete Tatsache, daß der Bogen unter bestimmten Bedingungen offensichtlich Gas wie eine Gasstrahlpumpe ansammelt. Dieser Effekt ist wünschenswert für die spektroskopische Messung, denn die dadurch erzielte Erniedrigung der Dichte in Außenbezirken des Bogens reduziert das störende Kontinuum, so daß die Linien aus dem Bogeninneren stärker hervortreten. Das Ansammeln des Gases geschieht offensichtlich im Anodenbereich, wo es Komponenten des Stromes senkrecht zum Magnetfeld gibt. Die "Pumpwirkung" besteht nur dann, wenn der Kesselraum zur Pumpe hin vollständig durch Strombahnen abgeschlossen ist. Wenn dagegen das Gas die Möglichkeit hat, in einem nicht stromführenden Bereich in den Kessel zurückzuströmen, wird der Effekt zunichte gemacht.

Die "zweite Anode" bringt außerdem eine bessere Rotationssymmetrie zustande, die zur Auswertung der Spektren unerlässlich ist.

Ergänzend zu der Geschwindigkeitsmessung wurde am "horizontalen Kessel" die axiale Plasmageschwindigkeit hinter der Anode gemessen. Dazu wurde die Wanderungsgeschwindigkeit von charakteristischen periodischen Helligkeitsschwankungen des Lichtes gemessen. Es ergab sich eine viermal größere Geschwindigkeit als die im Bereich zwischen Kathode und Ring-

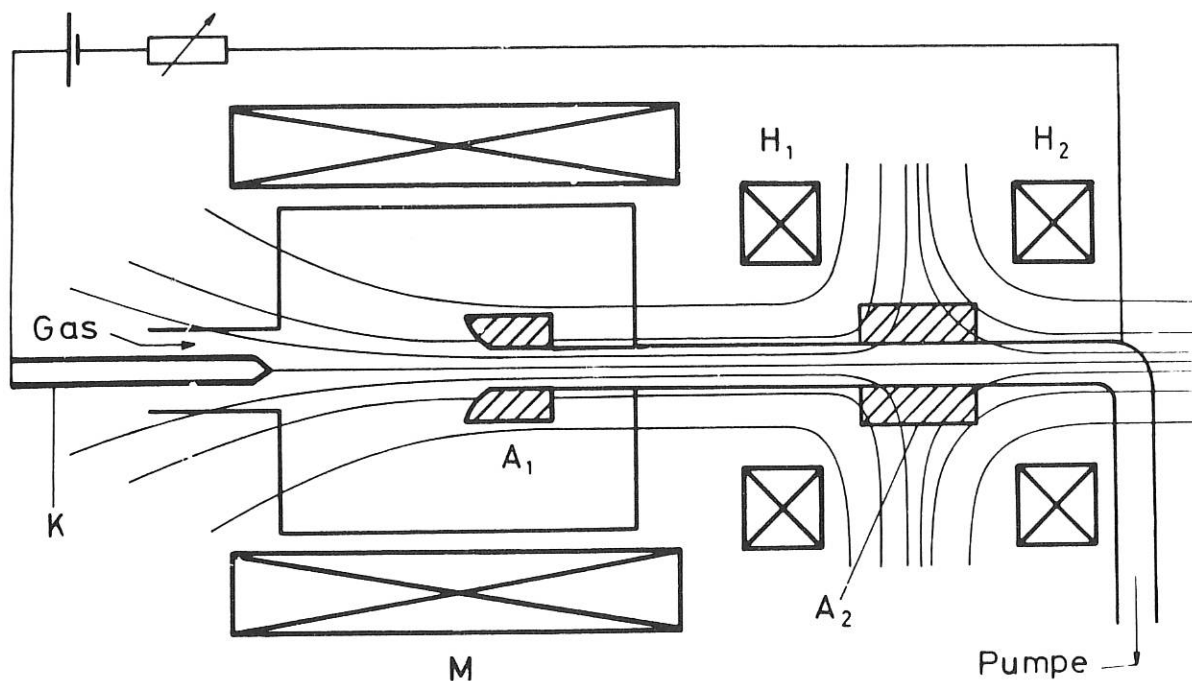


Abb. 8: K: Kathode; A1: 1. Anode; A2: 2. Anode; M: Haupt-Magnetfeld; H1: 1. Hilfsmagnetfeld; H2: 2. Hilfsmagnetfeld.

anode. Das steht im Einklang damit, daß hinter der Ringanode infolge des geringeren Magnetfeldes dort ein geringerer Druckaufbau¹⁾ zustande kommt, und das axiale Druckgefälle eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bewirken muß.

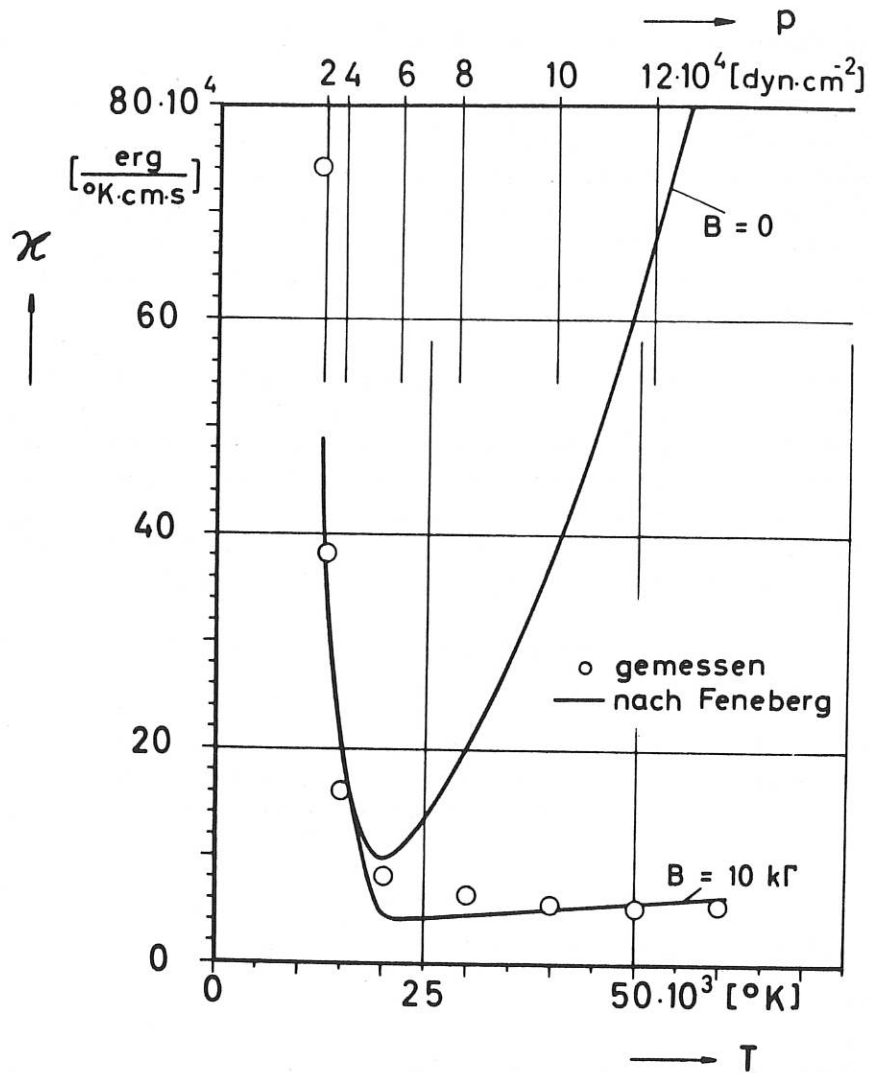
Am "horizontalen" Kessel wurde außerdem eine Bilanz zwischen der elektrisch hineingesteckten und der durch Wärmeleitung verlorenen Leistung durch kalorimetrische Messungen gezogen. Unter anderem wurde zur Messung der Energieaufnahme einer wassergekühlten 1 cm langen Scheibendüse, die den Bogen konzentrisch umgab, direkt der Leistungsverlust pro Bogenlängeneinheit gemessen. Der Wert - ca. 5 kW/cm - stimmte mit dem Ergebnis der Strom- und Feldstärkemessungen überein.

Aus einer Analyse des Temperaturprofils mit der Elenbaas-Hellerschen Differentialgleichung ergab sich die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Druck und Temperatur in Übereinstimmung mit den theoretischen Werten von Feneberg²⁾ und dem berechneten Temperaturprofil von Heidrich³⁾ (s. Abb. 9).

1) R. Wienecke, Z.f.Naturf. 18a, 1151 (1963)

2) W. Feneberg, VII Int. Conf. on Phenomena in Ion. Gases, Belgrad (1965)

3) U. Heidrich, Z.f.Naturf. 20a, 475 (1965)



Wärmeleitfähigkeit κ als $f(p,T)$

Abb. 9: Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur (für verschiedene Drücke)
(aus IPP 3/44)

Ein bisher noch nicht verstandener Druckanstieg innerhalb des Bogens im vollionisierten Teil, der nach den ursprünglichen Rechnungen¹⁾ nicht zu erwarten ist, konnte nun durch die Überlegungen von Klüber (IPP 3/48) auf den Nernst-Effekt im Plasma zurückgeführt werden.

1) R. Wienecke, Z.f.Naturf. 18a, 1151 (1963)

1.1 b) Langer Wasserstoffbogen im Magnetfeld

(K. Tichmann, G. Zankl)

Das Ziel dieser Untersuchungen ist eine weitere wesentliche Steigerung der Temperatur im Wasserstoffbogen über 100 000 °K hinaus. In diesem Temperaturbereich spielen neben den radialen Wärmeleitungsverlusten die axialen Wärmeleitungsverluste eine nicht mehr zu vernachlässigende Rolle in der Energiebilanz. Der Wärmestrom in axialer Richtung kann durch eine Vergrößerung der Bogenlänge reduziert werden. Entsprechende Abschätzungen, die im letzten Jahresbericht beschrieben wurden, ergaben, daß man mit einem 3 m langen Bogen Temperaturen in der Größenordnung von 500 000 °K erreichen sollte. Eine entsprechende Anordnung, bei der die Bogenlänge variabel bis auf 3 m verlängert werden kann, wurde aufgebaut.

Vorversuche ergaben, daß bei einem 3 m langen Bogen der Bogendurchmesser auf nahezu 10 cm ansteigt, während er bei einem 20 cm langen Bogen 3 cm betrug. Bei konstanter Bogenstromstärke sinkt daher die Stromdichte, was eine niedrigere Temperatur zur Folge hat. Es wurde versucht, den Bogendurchmesser durch wassergekühlte Düsen (Innendurchmesser 2,5 cm), die in einem Abstand von etwa 30 cm angeordnet sind, zu begrenzen. Auf diese Weise gelang es tatsächlich, eine Bogenentladung mit einer Gesamtlänge von zunächst 1,50 m zu erzeugen, wobei der Durchmesser etwa 3 cm beträgt.

Um eine Zündung über die Wand des Entladungsgefäßes zu verhindern, wurden anstelle der bisher benutzten V2A-Kessel Entladungsrohre aus Glas verwendet.

Die Reproduzierbarkeit der Entladung wurde bereits geprüft. Dazu wurde der Bogen sidon auf den Spalt eines Monochromators abgebildet und der zeitliche Verlauf der Intensität der He II-Linie 4686 und von H β während der Pulszeit von maximal 1 sec mit einem Multiplier gemessen.

1.1 c) Besetzung der Energieniveaus alkali-ähnlicher Ionen

(C. Mahn)

Theoretische Überlegungen über den Zusammenhang zwischen der Temperatur und den gemessenen Linienintensitäten ergaben sich aus der Frage, ob in einem für C IV-Ionen optisch dünnen Plasma das stationäre Ionisationsverhältnis $C V / C IV$ durch die KORONA-Formel beschrieben werden kann. Die Rechnungen befassen sich mit dem Fall, daß die Ionen, für die das Plasma als optisch dünn zu betrachten ist, der isoelektrischen Sequenz von Li I, Na I oder K I angehören. Dazu zählen u.a. C IV, N V und O VI, das sind Ionen, die in vielen Plasmen gegenwärtig sind und auch oft zu spektroskopischen Messungen herangezogen werden. Das vorgeschlagene Modell umschließt auch die wasserstoffähnlichen Ionen, und das Ergebnis weist auf einen entscheidenden Unterschied der Alkaliähnlichen gegenüber den Wasserstoffähnlichen hin.

In Ermangelung hinreichender Kenntnis über die Stoßquerschnitte wird folgendes Modell vorgeschlagen:

Das Termschema eines alkaliähnlichen Ions (Grundzustand mit der Hauptquantenzahl p_0) soll wie dasjenige des entsprechenden wasserstoffähnlichen Ions beschaffen sein, nur mit dem Unterschied, daß der Grundzustand nicht zur Hauptquantenzahl 1 sondern zur Hauptquantenzahl p_0 gehört (z.B. $p_0 = 2$ für Lithiumähnliche und $p_0 = 3$ für Natriumähnliche). Begründet wird dieses Vorgehen damit, daß das Interesse vorwiegend Ionen relativ hoher Ladung

gilt, und daß der Quantendefekt bekanntlich mit zunehmender Ionenladung in der isoelektrischen Sequenz abnimmt. Dementsprechend werden für die Querschnitte der Strahlungs- und Stoßprozesse diejenigen von wasserstoffähnlichen Ionen verwendet. Da aber sogar für derartige Ionen die Querschnitte für Stoßanregungen aus angeregten Zuständen nicht bekannt sind, wohl aber recht gut die Ionisierungsquerschnitte, wird folgender Weg vorgeschlagen:

Man fordere, daß der Ionisierungsquerschnitt sich durch Grenzübergang aus den Anregungsquerschnitten ableiten läßt, ganz analog dazu, wie sich bei den Strahlungsprozessen aus den Koeffizienten für Spontanemission die Koeffizienten der zugeordneten Rekombinationskontinua ableiten lassen. Die Notwendigkeit dafür, daß ein derartiger Grenzübergang von Querschnitten für gebunden-gebunden-Prozesse auf frei-gebunden-Prozesse möglich sein muß, ergibt sich aus der Forderung, daß bei der Berechnung der stationären Besetzungen aus dem System linearer Gleichungen die Lösungen, speziell z.B. die für die Besetzung des Grundzustandes, nicht mehr von der Gleichungszahl abhängen dürfen, d.h. von der Zahl der gebundenen Zustände des Ions, sofern nur mindestens das letzte noch gemäß dem LTE-Wert besetzt ist. Daraus ergibt sich: Ordnet man dem Ion statt unendlich vieler Zustände nur endlich viele zu, so fehlen im Gleichungssystem alle diejenigen Prozesse, die mit den vernachlässigten Zuständen verknüpft waren. Der entstandene Fehler kann wettgemacht werden durch eine entsprechende Zunahme von frei-gebunden-Prozessen in das so zum Kontinuum hinzugekommene Gebiet des "Pseudo-Kontinuums" unterhalb der theoretischen Ionisierungsgrenze. Das stellt eine "Konsistenz-Forderung" an die Koeffizienten dar, die für die Stoßquerschnitte besagt, daß sich der Querschnitt für Ionisierung "korrespondenzmäßig" durch Grenzübergang aus demjenigen für Anregung herstellen lassen muß. Da der Ionisierungsquerschnitt der bekanntere ist, stellt man daher das Problem so: Wie müssen die Anregungsquerschnitte aussehen, damit sich nach Grenzübergang aus ihnen der vorgegebene Ionisierungsquerschnitt ergibt? Daraus erhält man dann zwangsläufig einen Verlauf für den Anregungsquerschnitt, der mit dem Ergebnis quantenmechanischer Überlegungen zur Berechnung von Anregungsquerschnitten bei Ionen übereinstimmt.

Mit diesen Querschnitten stellt sich dann heraus, daß die Mitwirkung der angeregten Zustände für das Ionisationsgleichgewicht bei wasserstoffähnlichen Ionen nicht groß ist, daß also ihr Ionisationsgleichgewicht recht gut durch die KORONA-Formel wiedergegeben wird. Aber schon bei lithiumähnlichen Ionen ($p_0 = 2$) hat der weitaus geringere Abstand zwischen dem Grundzustand und dem ersten angeregten zur Folge, daß in kritischen Elektronendichten-Bereichen ein Unterschied von einem Faktor 20 gegenüber der KORONA-Besetzung vorliegt. Außerdem erweist sich, daß diese Abweichung gar nicht empfindlich von der genauen Struktur der Querschnitte abhängt, sondern fast ausschließlich durch die Struktur des Termschemas bestimmt ist. Bei den im Bogenexperiment vorliegenden Elektronendichten ist die Abweichung allerdings noch zu vernachlässigen, doch bei zehnmal größeren Elektronendichten ($\approx 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) wären die Abweichungen merklich.

1.1 d) Ausströmen eines Lichtbogenplasmas ins Vakuum

(H.F. Döbele)

Um ein möglichst homogenes Plasma mit großem Querschnitt und großer Sauberkeit bei Teilchendichten von $n_e \approx 10^{13}$ zu erzeugen, sollte versucht werden, das Plasma eines Lichtbogens ins Vakuum austreten zu lassen.

Zur Aufrechterhaltung des selbständigen Brennzustandes ist an der Kathode ein Mindestdruck erforderlich. Folgende Anordnung wurde aufgebaut:

An eine 4 mm starke Wolframkathode schloß sich ein aus gegeneinander isolierten dünnen Kupferplatten bestehender Entladungskanal von etwa 10 cm Länge und 5 mm lichter Weite an.

Etwa 5 cm dahinter befand sich eine Ringanode. An der Kathode wurde Wasserstoff zugeführt; auf der Anodenseite wurde mit einer Roots- und einer Öldiffusionspumpe abgepumpt. Ein Magnetfeld von etwa 3 kG war der Entladung axial überlagert.

Zwei Effekte bewirken das Auftreten der notwendigen Druckdifferenz zwischen Kathode und Anode:

- 1) Thermische Verblockung
- 2) Wandreibung.

Beide Effekte wurden unter stark vereinfachenden Annahmen rechnerisch untersucht. Dabei zeigte sich, daß der Einfluß der Reibung vorherrscht und daß das Druckverhältnis $\frac{p_{\text{Kathode}}}{p_{\text{Anode}}} > 10^4$ sein kann.

Mit der beschriebenen Anordnung wurde bei folgenden Parametern gearbeitet: Bogenstrom 50 bis 100 A, Magnetfeldstärke 3 kG, $p_{\text{Kathode}} \approx 3$ Torr; $p_{\text{Anode}} \approx 5 \cdot 10^{-3}$ Torr. Schwierigkeiten bereitete der kathodenseitige Bogenansatz (Zurückwandern längs der Kathode!). Damit verbunden war eine starke Verunreinigung des an der Anode austretenden Plasmastrahles. Isolation und Kühlung der den Entladungskanal bildenden Kupferplatten war ebenfalls noch ungenügend.

1.2 Eieruhr

(K. Bergstedt, P. Grassmann, O. Klüber, H. Wulff)

Während der ersten Hälfte des Jahres wurde noch im Max-Planck-Institut in Freimann experimentiert, während der zweiten Jahreshälfte erfolgte der Abbau und Neuaufbau des Experiments im IPP. Der Neuaufbau war Ende des Jahres noch nicht abgeschlossen.

In der Eieruhr können stationäre und instationäre Plasmen erzeugt werden¹⁾. Nachdem schon im vorangegangenen Berichtsjahr die radiale Elektronendichteverteilung in He-Plasmen gemessen wurde, gelang es, den radialen Temperaturverlauf bis zur Achse hin zu messen (Abb. 10).

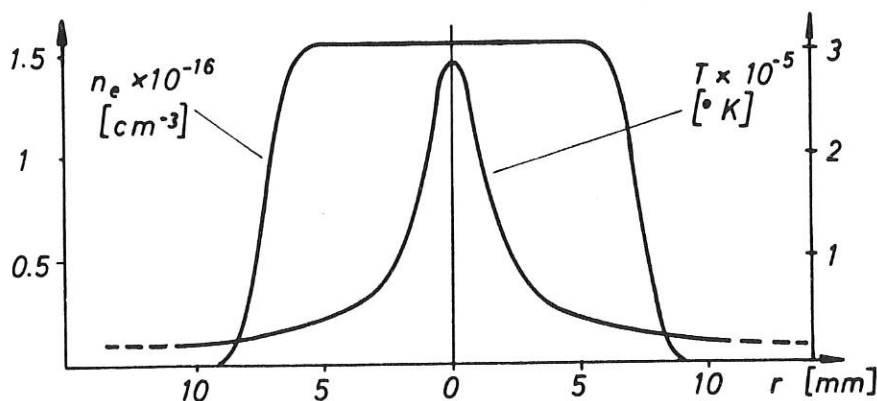


Abb. 10: Radiale Temperatur- und Elektronendichteverteilung in der Eieruhr.

1) H. Wulff: "Production and Behaviour of a Magnetically Stabilized High-Density, High-Temperature Plasma", Proceeding of the VII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Vol. I, p. 829, Belgrade (1965)

Die in He-Plasmen gefundene Achsentemperatur von $4 \cdot 10^5$ °K ist kleiner als die Maximaltemperatur in H-Plasmen, wie aus der dort weiter fortgeschrittenen Ionisation von Verunreinigungen geschlossen werden kann.

Insbesondere gelang es, den aufgrund der gemessenen Zustandsgrößen ermittelten Druckaufbau im Plasma zu klären (Abb. 11).

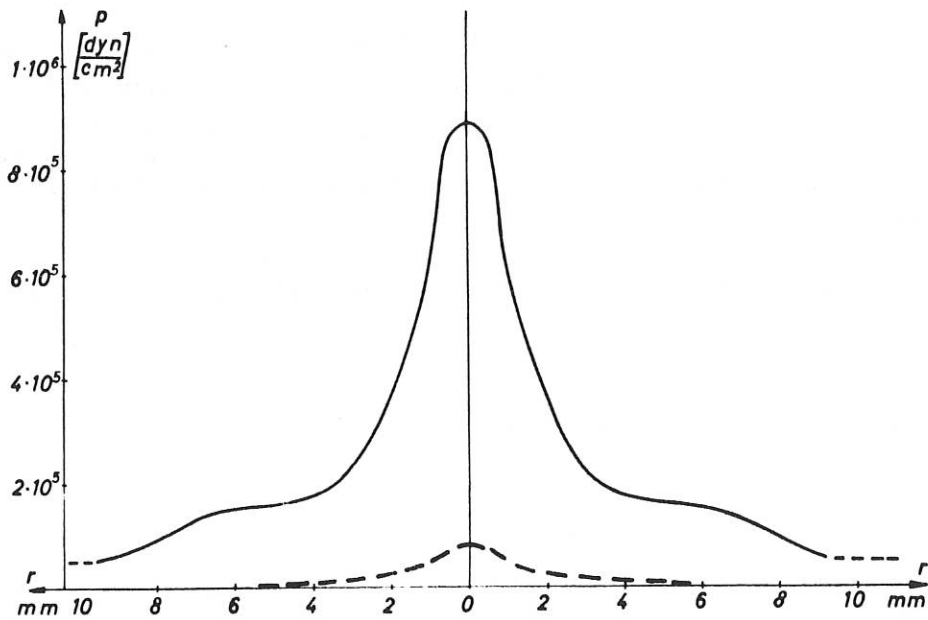


Abb. 11: Radialer Verlauf von Elektronendichte und Temperatur im Eieruhr-Plasma.

Es ergab sich, daß er nicht durch die Wirkung des Entladungsstromes, also den Pinch-Effekt: $\left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)_1 = -\frac{1}{c} j_z B_\varphi$ zu erklären ist, sondern durch die Wirkung azimuthaler Plasmaströme: $\left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)_2 = \frac{1}{c} \cdot j_\varphi B_z$

In den Randzonen wird die azimuthale Stromdichte durch den Effekt der ambipolaren Diffusion hervorgerufen, worüber schon berichtet wurde. Als Ursache der azimuthalen Ströme im vollionisierten Plasma wurde ein bisher meist vernachlässigter thermomagnetischer Effekt erkannt, der sog. Nernsteffekt. Aufgrund der Theorie des Effektes wurde vorausgesagt, daß die Elektronendichte über den Radius konstant sein müsse (Abb. 10). Darüber und über die Messung des Druckverlaufs wird in den Doktor-Arbeiten von O. Klüber und P. Grassmann berichtet [IPP 3/48 und 3/47].

Da es sich beim Eieruhrplasma um ein langsam strömendes Plasma handelt, mußte untersucht werden, ob die Ionisations-Relaxationszeiten klein genug sind, damit eine Ionisation entsprechend der lokalen Elektronentemperatur gewährleistet ist. Der experimentelle Befund ergab, daß das nicht der Fall ist. Über die gefundene "Ionisationsverschleppung" wird im Laufe des folgenden Jahres berichtet werden.

2. Lasererzeugte Plasmen

(K. Büchl, H. Krause, P. Mulser, H. Salzmann, R. Sigel, S. Witkowski)

Die hohe Leistungsdichte, die sich im Brennpunkt eines fokussierten Laserstrahles erreichen läßt, eröffnet die Möglichkeit, ein Wasserstoff- bzw. Deuteriumplasma sowohl verunreinigungsfrei als auch magnetfeldfrei im Vakuum zu erzeugen. Als weitere Vorteile ergeben sich eine sehr hohe Teilchendichte ($10^{18} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) und relativ hohe Temperaturen zwischen 10 und 100 eV. Von Nachteil sind das kleine Plasmavolumen und die kurze Lebensdauer des Plasmas.

Die zur Erzeugung eines solchen Plasmas durchgeführten experimentellen Arbeiten gliedern sich in:

- a) Erzeugung und Messung eines Laserimpulses genügender Größe,
- b) Erzeugung eines festen Wasserstofftropfens,
- c) Aufhängung des Tropfens im Vakuum und
- d) Triggern des Lasers.

Daneben wird das Verhalten eines H_2 - bzw. D_2 -Tropfens bei der Aufhängung und Expansion theoretisch untersucht.

Für die Experimente stehen zwei große Rubin-Laser zur Verfügung. Ein Korad K1500 System für 1,1 GW wurde in den letzten Tagen des Berichtszeitraumes in Betrieb genommen. In Zusammenarbeit mit der Abt. Technik wurde ein zweistufiger 500 MW Rubin-Laser entwickelt. Ein bereits vorhandener kleiner Rubin-Laser wurde, ebenfalls in Zusammenarbeit mit der Abt. Technik, für Q-Switch-Betrieb mit passivem Schalter umgebaut. Für die Energie- und Leistungsmessung des Laserstrahls sind Geräte im Bau.

Zur Erzeugung des festen Deuteriums wird mit Hilfe eines Kühlfingers zunächst an einer Kapillare ein einzelner flüssiger Wasserstofftropfen erzeugt. In seiner Umgebung herrscht der Sättigungsdampfdruck des Wasserstoffs von etwa 100 Torr. Nach Abfall des Tropfens von der Kapillare gelangt er durch zwei druckmindernde Schleusen in eine Hochvakuumkammer. Während des Falls soll der Tropfen durch Verdampfung fest werden, durch Elektronen aufgeladen und durch elektrische Kräfte im Fokus des Laserstrahls gehalten werden. Anhand der berechneten Verdampfung des Tropfens wurde eine Reihe von Elementen der geplanten Apparatur entworfen und gebaut. Der Kryostat enthält den mit gasförmigem Helium gekühlten Kühlfinger. Das Schleusensystem der Fallstrecke besteht aus schnellen Ventilen und Druckausgleichsgefäßen. Die pneumatisch betätigten Kugelventile werden durch den abfallenden Tropfen mit Hilfe einer optischen Programmsteuerung ausgelöst. Die Vakuumkammer, die Ventile mit ihrer Steuerung und die Kühlanordnung wurden bereits erprobt.

Da die aus dem Kryostaten abfallenden Wasserstofftropfen nach einigen Millisekunden noch zu groß sein werden (etwa 2 mm statt $200 \mu \varnothing$) und nur in den seltensten Fällen durch den Fokus des Laserstrahles fallen würden, wurde eine elektrodynamische Aufhängung von Makroteilchen entwickelt. In einem Würfelkondensator werden an die Plattenpaare Wechselspannungen (50 Hz, einige kV) gelegt, die jeweils um 120° phasenverschoben sind. Gelangt ein geladenes Makroteilchen mit geringem Impuls in das Gebiet um die Würfelmitte, so wird es dort eingefangen und beschreibt Lissajousfiguren. Es gelang, statisch aufgeladene Styroporkügelchen, die von der Seite eingeworfen wurden, aufzuhängen. Diese Methode weist zwei Nachteile auf: Erstens werden die Lissajousfiguren im Vakuum, wo das Experiment durchgeführt werden soll, nicht ausgedämpft, da die Luftreibung fehlt. Zweitens sind die Einfangbedingungen sehr kritisch, so daß ein frei in den Würfel fallender Tropfen in den meisten Fällen nicht eingefangen wird. Deshalb wurde ein Regler entworfen, der die Lage des Teilchens optisch registriert und danach die Spannungen an den Plattenpaaren steuert. Er soll Teilchen, die mit einer Geschwindigkeit bis zu 1 m/sec und einer spezifischen Ladung von etwa 10^{-3} Cb/kg in das Meßgebiet eintreten, bremsen und einfangen. Seine Erprobung steht bevor.

Theoretisch wurde das dynamische Verhalten eines durch einen Laserstrahl aufgeheizten Wasserstofftropfens untersucht. Dazu wurde ein einfaches Modell benutzt. Die Aufheizung des Tropfens soll schnell gegen die Expansionszeit erfolgen und sie soll im ganzen Tropfen homogen sein. Bei Vernachlässigung der Stöße zwischen den Teilchen lassen sich dann Dichte und Geschwindigkeit der Teilchen in Abhängigkeit von Ort und Zeit in geschlossenen Ausdrücken darstellen. Die Auswertung mit den im Experiment vorgesehenen Daten zeigte, daß die für die Messung interessante Expansionsphase zwischen 10 und 100 nsec liegt.

3. Stoßwellenexperimente und Probleme nichtstationärer MHD-Konversion, Plasmaeinschuß

(H. Muntenbruch)

3.1 Wechselwirkung zwischen Membranrohrstoßwellen und Magnetfeldern

Die im Jahr 1965 begonnenen Messungen an stationären Stoßwellen mit und ohne Quermagnetfeld wurden fortgesetzt. Dabei wurde von Messungen in Kammern kreisförmigen Querschnittes auf solche in rechteckigen Kanälen übergegangen.

3.1 a) Strommessungen in kreiszylindrischen Meßkammern

(H. Klingenberg)

Die Messungen in solchen Kammern konnten abgeschlossen werden, die Ergebnisse wurden im Laborbericht IPP 3/45 zusammengestellt. Der zeitliche Verlauf der Ströme in den MHD-(Faraday)Generator-Stromkreisen läßt außer dem Einfluß von Außenwiderstand, Elektrodenfläche und Anfangsleitfähigkeit im Kanal (s. Jahresbericht 1965) auch den Einfluß der Induktivität der MHD-Stromkreise und der Relaxation hinter der Stoßfront in Argon auf den Stromverlauf und den Innenwiderstand erkennen (s. Abb. 12 u. 13).

Mit dem gemessenen Innenwiderstand und der (mit Hilfe der gasdynamischen Gleichungen) berechneten Ausgangsleitfähigkeit des Plasmas hinter der Stoßfront konnte der Durchmesser des Entladungskanals (im Plasma, quer zur Strömungsrichtung) abgeschätzt werden. Er ist viel kleiner als der Innendurchmesser des Stoßrohres. Die Entladungen zwischen den Elektroden müssen also als Lichtbögen angesehen werden. Die Abschätzungen ließen auch erkennen, daß die Wechselwirkung dabei vernachlässigbar bleiben sollte.

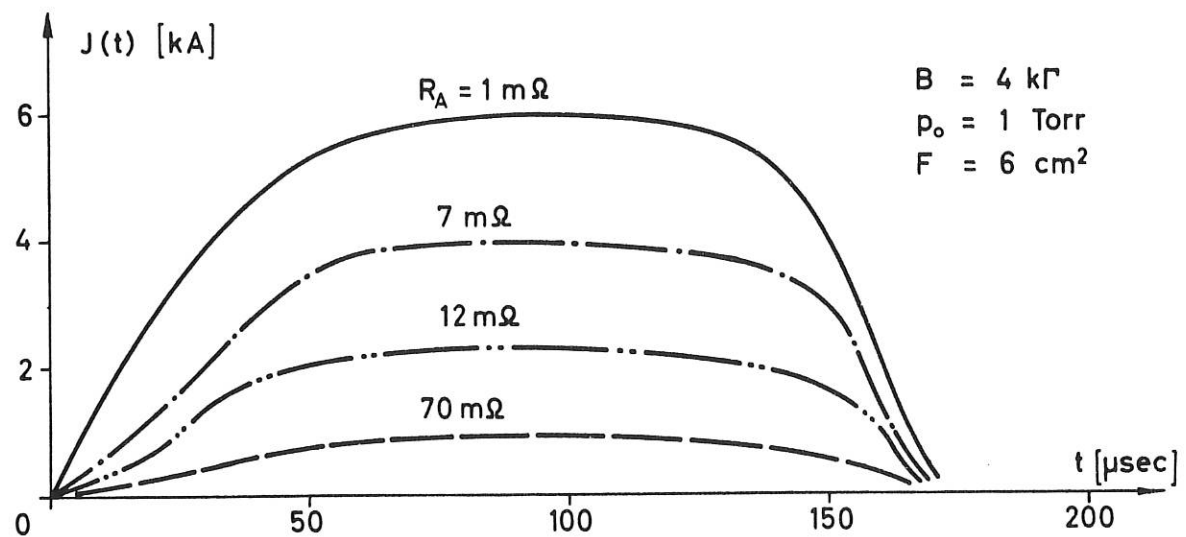
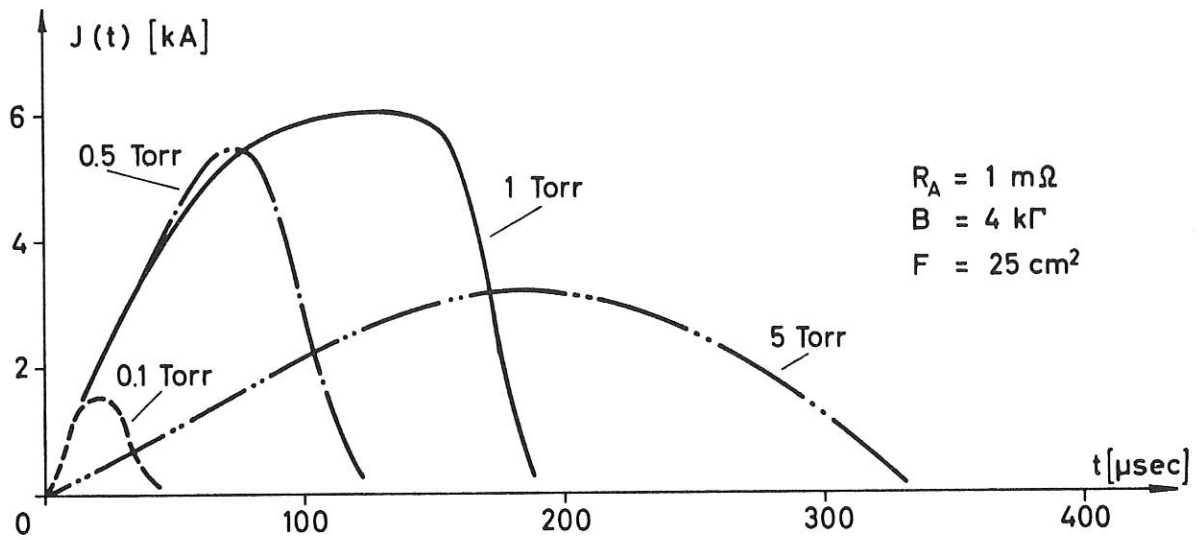
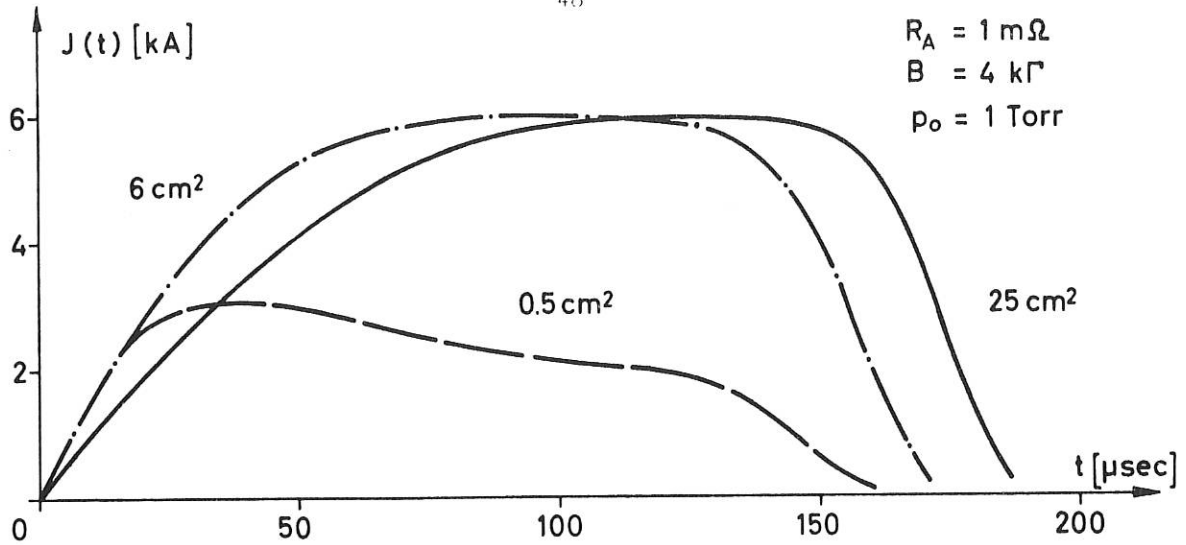


Abb. 12: Zeitlicher Verlauf des Stromes. Parameter sind Elektrodenfläche F , Anfangsdruck p_0 und Außenwiderstand R_a (aus IPP 3/45).

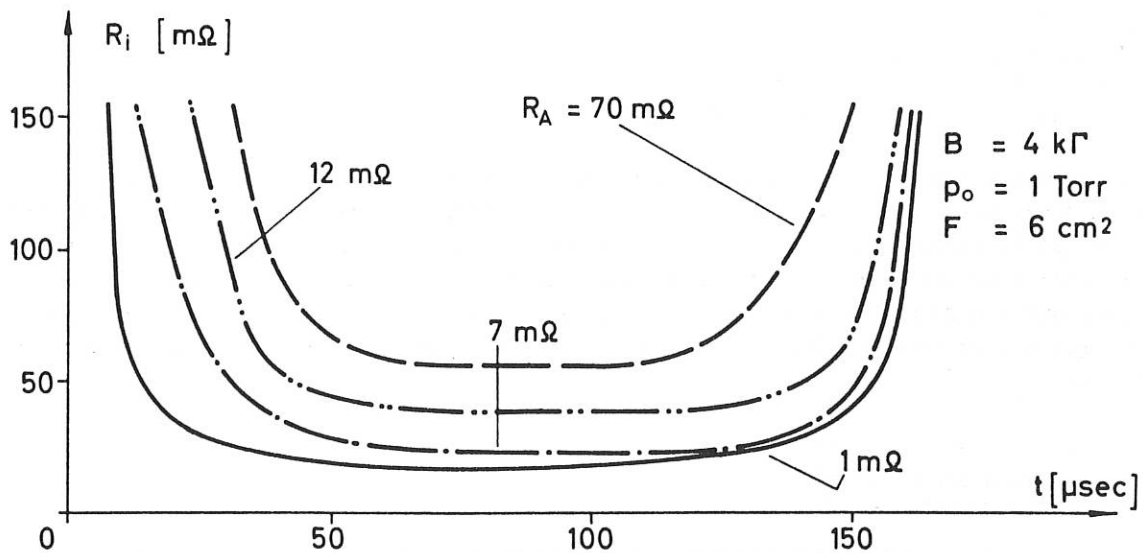
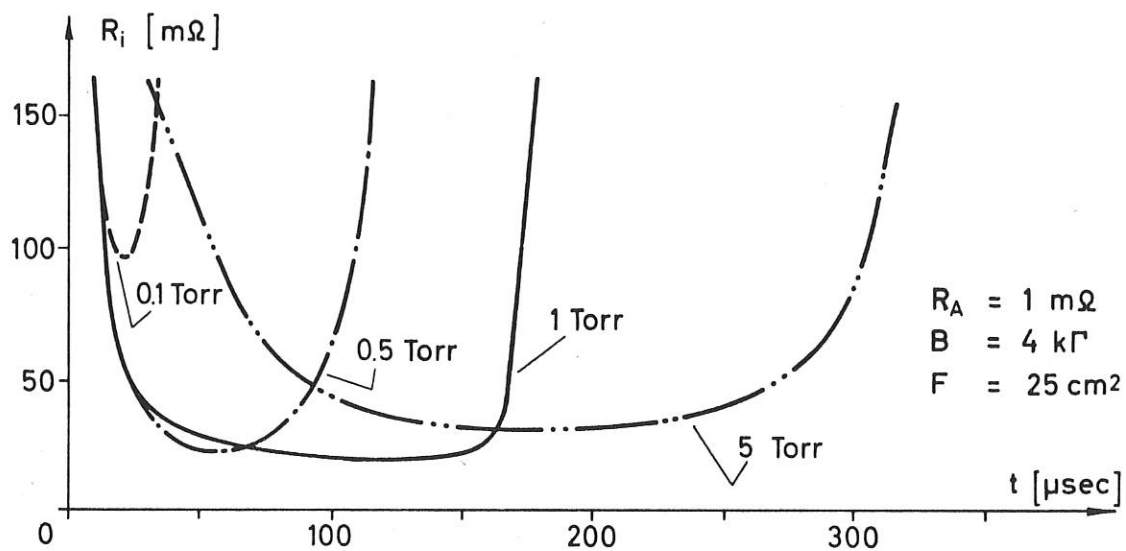
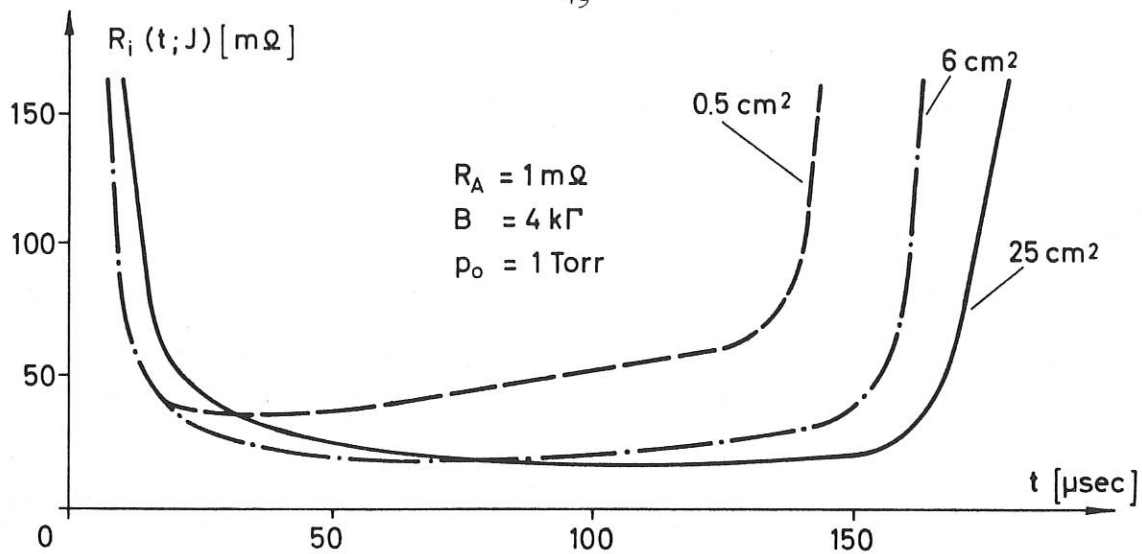


Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des Innenwiderstandes. Parameter sind Elektrodenfläche F , Anfangsdruck p_0 und Außenwiderstand R_A (aus IPP 3/45).

3.1 b) Experimente mit Kanälen rechteckigen Querschnitts

(H. Klingenberg)

1) Technische Probleme

Um die Wechselwirkung zu erhöhen, muß der Kanal im Wechselwirkungsbereich gleichmäßiger und in einem größeren Volumen mit den Querströmen "gefüllt" werden. Einfacher als die Verwendung geheizter Elektroden, die diese Forderung evtl. verwirklichen ließen, erschien die Benutzung vieler neben- und hintereinander angeordneter, getrennt verbundener Elektrodenpaare.

Ein System auswechselbarer "Scheiben", die sich zu einem Kanal mit rechteckigem Querschnitt zusammenfügen lassen, wurde entwickelt. Es gestattet nicht nur den Einbau vieler Elektroden-systeme und ermöglicht die Beobachtung von allen Seiten her (die Scheiben sind aus Plexiglas), sondern die Rechteckgeometrie liefert auch die klaren Bedingungen, die bei einem so komplexen System unerlässlich sind. - Zur Erleichterung interferometrischer Beobachtungen konnten auch noch optische Fenster in den Kanal eingebaut werden. Das Scheibensystem hat schon einige hundert "Schüsse" ohne irgendwelche Beschädigungen ausgehalten.

β) Differentialinterferometermessungen

(W. Zimmermann)

Die im Jahresbericht 1965 erwähnte Punktfunkenstrecke wurde weiterentwickelt und spektroskopisch untersucht, so daß mit einem geeigneten Interferenzfilter ein Spektralbereich ausgeblendet werden konnte, in dem das Eigenleuchten des Stoßwellenplasmas die Interferenzstreifen nicht überstrahlt.

Die Interferenzaufnahmen lassen die (ungestörte) Stoßwelle auch im Wechselwirkungsbereich erkennen und zeigen, daß sie im Rahmen der Meßgenauigkeit eben ist. Ein Einfluß der "Lichtbögen" auf die Plasmadichte und das Strömungsverhalten war nicht festzustellen.

3.1 c) Mikrowellendiagnostik

(G. Meinhold als Gast, A. Siddiqui)

Die Eigenschaften eines quer durch das Stoßrohr gespannten Lecherdrahtsystems, mit dem in einem 3 cm- bzw. 4 mm-Interferometer die Elektronendichte hinter der Stoßfront gemessen werden soll, wurden untersucht. Dabei wurden Länge und Abstand der Lecherdrähte variiert, vor allem aber das Verhalten verschiedener fin-line-Typen als Übergänge vom Hohlrohrleiter auf die Drähte verglichen. Dabei wurden Transmission, Reflexion und Abstrahlung im Frequenzbereich von 8,2 bis 12,4 GHz gemessen und ein besonders günstiges System ermittelt.

3.2 Plasmaeinschuß

Im Berichtsjahr erfolgte im wesentlichen der technische Aufbau des Experiments (s. Jahresbericht 1965)

3.2 a) Technische Probleme

(H. Brinkschulte, W. Makios)

1) Kondensatorbatterie

Die Wiederinbetriebnahme der Batterie für den konischen θ -Pinch bereitete unerwartete Schwierigkeiten, die vor allem auf Einstreuungen in das Steuerungs- und Zündsystem der Anlage, u.a. wegen der komplizierten Erdungsverhältnisse, zurückzuführen waren. Erst nach Einbau pneumatisch betätigter Schalter und Trenner war ein befriedigender Betrieb der Batterie gewährleistet.

2) Vakuumsystem

Das übernommene UHV-Pumpsystem wies extrem kleine Leitungsquerschnitte auf, die einen völligen Umbau des Pumpstandes erforderlich machten. Nunmehr lassen sich - auch nach unvollständigem Ausheizen - in genügend kurzer Zeit Vakua von 10^{-7} Torr erreichen (Leckzahl 10^{-7} Torr · Liter/Sekunde).

3) Schnelles Ventil

Ein nach einem übernommenen Konstruktionsvorschlag gebautes Gaseinlassventil konnte weiterentwickelt werden, so daß jetzt bei einer Leckzahl des Ventils $< 10^{-9}$ T · l/sec ein zuverlässiger, reproduzierbarer Betrieb mit Öffnungszeiten von 50 bis 150 μ sec und 10^{17} bis 10^{19} Teilchen pro Öffnungsvorgang erreicht ist.

Die Bewegung des Ventiltellers wurde mit Hilfe von Mikrowellen-Doppler-Messungen studiert, die Dichte der Gaswolke bei ihrer Ausbreitung im Bereich der θ -Pinch-Spule räumlich und zeitlich aufgelöst mit einem Mach-Zehnder-Interferometer gemessen.

4) 27 MHz-Sender zur Vorionisierung

Zur Vorionisierung des eingelassenen Gases wurde ein 27 MHz - 1 kW-Sender gebaut und angepaßt. Mit einer sehr empfindlichen Mikrowellen-Brücke wurde die Elektronendichte innerhalb der Koppelspule gemessen. Sie beträgt nur ca. 10^{10} cm $^{-3}$. - Deshalb wurden Überlegungen zur Vorionisierung mit Mikrowellen angestellt, für die Magnetrons im 3 cm- und 10 cm-Bereich mit Impulsleistungen > 200 kW zur Verfügung stehen.

3.2 b) Erste Messungen

(H. Brinkschulte, W. Makios)

Mit Multipliern wurde die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Plasmawolke im Rohr ohne magnetisches Führungsfeld untersucht. Geschwindigkeiten im Bereich um $5 \cdot 10^6$ cm/sec wurden gemessen, aber das Durchschwingen der Batterie führt zu komplizierten Beschleunigungsverhältnissen (nachlaufende Plasmawolken und Ausbildung von Stoßwellen), die es notwendig erscheinen lassen, zum Einimpulsbetrieb (Power-Crowbar-Anordnung) überzugehen.

3.2 c) Supraleitende Spulen

Das Führungsfeld soll zwar für die ersten Experimente aus konventionellen Spulen aufgebaut werden, jedoch wurden Vorüberlegungen angestellt, um möglichst bald zu Supraleitungsspulen

überzugehen. Sowohl das Problem des durchbrochenen Kryostaten als vor allem das Zusammenwirken von Θ -Pinch-Stoßspule und Supraleitungsspule erscheinen beim heutigen Stand der Technik lösbar. - Die Abt. Technik hat gerade für die Bearbeitung dieser Probleme schon wertvolle Vorarbeit geleistet.

4. Magnetoplasmadynamik

(G. Brederlow, M. Salvat^{+))}

4.1 Segmentierter MHD-Generator mit Gaskreislauf

(G. Brederlow, M. Salvat)

Der im Jahresbericht 1965 bereits beschriebene Aufbau eines MHD-Generators mit geschlossener Gasführung ist abgeschlossen worden. Die Anlage wurde in Betrieb genommen. Der erwartete Massendurchsatz von 100 g Argon pro sec bei einer Gastemperatur von 2000 °K konnte erreicht werden. Für einen sicheren technischen Betrieb der Anlage wurden noch zusätzliche Einrichtungen entwickelt. Ihre Arbeitsweise entspricht den Erwartungen (IPP 3/40). Die Einrichtung zur Messung der Stromdichteverteilung im Generator wurde fertiggestellt. Die theoretisch erwarteten Stromdichten konnten im Generator jedoch noch nicht erreicht werden. Hierfür muß die geringe thermische Elektronenemission der Elektroden verantwortlich gemacht werden. Sie wird jetzt durch fremdgeheizte Elektroden verbessert.

4.2 Messung der Elektronentemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit in einem Argon-

Kalium-Plasma bei gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern

(G. Brederlow, R. Hodgson)

Die skalare elektrische Leitfähigkeit, der Hall-Koeffizient $\omega_e \tau_e$ und die Elektronentemperatur wurden in einem Argon-Kalium-Plasma unter MHD-Generator-Bedingungen untersucht.

Nach Theorien mit vereinfachenden Annahmen soll die skalare elektrische Leitfähigkeit unabhängig vom Quermagnetfeld sein. Berechnungen von W. Feneberg mit Hilfe des Enskog'schen Näherungsverfahrens ergaben jedoch, daß sich die skalare elektrische Leitfähigkeit für ein nicht voll ionisiertes Gas, dessen Atome einen stark geschwindigkeitsabhängigen Ramsauer-Querschnitt haben, bei angelegtem Magnetfeld verringert. Die Leitfähigkeitsmessungen zeigten diese Abnahme. Die im Jahresbericht 1965 angegebenen Ergebnisse wurden bestätigt. Die gemessene Leitfähigkeitsabnahme war bei angelegtem Quermagnetfeld größer als die berechnete. Diese Abweichung ist darauf zurückzuführen, daß Instabilitäten und Turbulenzen im stromführenden Plasma entstehen. Sie sind auch dafür verantwortlich zu machen, daß der effektive Hall-Koeffizient nahezu unabhängig von der Magnetfeldstärke bei Stromdichten größer als 100 mA/cm² ist. (s. Abb. 14).

Leitfähigkeitsmessungen in Helium, dessen Atome einen nahezu von der Elektronenenergie unabhängigen Wirkungsquerschnitt haben, zeigten, daß die skalare elektrische Leitfähigkeit bis zu Stromdichten von 400 mA/cm² durch ein Quermagnetfeld nicht vermindert wird. Bei größeren Stromdichten trat eine Abnahme auf; es waren dann auch Instabilitäten festzustellen.

+) EURATOM

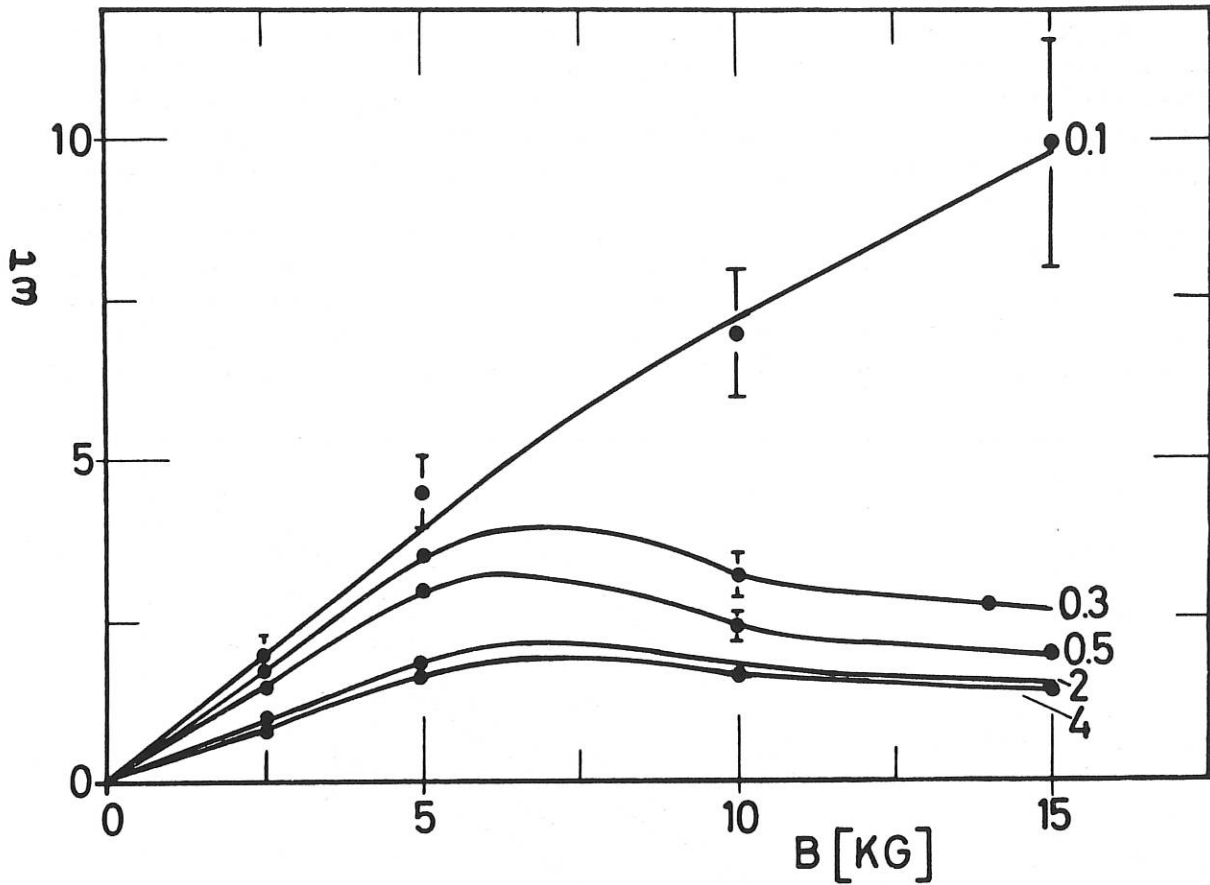


Abb. 14: Hall-Koeffizient $\omega\tau$ in Argon als Funktion der magnetischen Feldstärke B für verschiedene Stromdichten A/cm^2

4.3 Instabilitäten in MHD-Generatoren

(W. Riedmüller)

Die Messungen ergaben, daß Instabilitäten (magnetoakustische, elektrothermische) die skalare elektrische Leitfähigkeit in MHD-Generatoren beeinflussen können. Um diesen Einfluß zu untersuchen, wurde mit der Planung und dem Aufbau eines Experimentes zur Bestimmung des Frequenzspektrums, der Dispersionsbeziehung und evtl. der Anwachsraten von Instabilitäten in einem strömenden Argon-Kalium-Plasma in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern begonnen.

4.4 Messung von elektrischer Leitfähigkeit und Elektronentemperaturen in einem Argon-Kalium-Plasma bei verschiedenen Gastemperaturen (ohne Quermagnetfeld)

(G. Brederlow, M. Salvat, R. Schwenn)

In einem strömenden Argon-Kalium-Plasma wurde die Erhöhung der Elektronentemperatur und die elektrische Leitfähigkeit bei Gastemperaturen zwischen $1400^\circ K$ und $2400^\circ K$ mit verschiedenen

Kaliumzusätzen in Abhängigkeit von der elektrischen Stromdichte untersucht. Die elektrische Leitfähigkeit wurde aus Strom-Spannungscharakteristiken, die Elektronentemperatur mit der Linienumkehrmethode bestimmt. Dazu wurde die Anwendbarkeit der Linienumkehrmethode zur Messung der Elektronentemperatur unter Berücksichtigung von Atom-Atom-Stoßanregungen untersucht. Ebenfalls wurde der Leitfähigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Stromdichte berechnet. Bei Stromdichten von 0 - 0,1 A/cm² ist die gemessene Leitfähigkeit stets größer als die berechnete. Diese Abweichung wird durch eine Überschußträgerdichte verursacht, die aus dem heißeren Aufheizsystem in den Meßkanal verschleppt wird. Berechnungen der Rekombinationsraten standen mit den Meßergebnissen in Übereinstimmung. Bei Stromdichten größer als 0,1 A/cm² ist die gemessene Leitfähigkeit kleiner als die berechnete. Hierfür müssen die wegen der Kontraktion der Entladung überhöhten Strahlungsverluste pro cm³ verantwortlich gemacht werden. Bei Stromdichten über 1 A/cm² stimmten die gemessenen und berechneten Leitfähigkeitswerte qualitativ überein. Die gemessenen Werte zeigten jedoch nicht eine so starke Abhängigkeit von der Gastemperatur, wie es die Berechnungen erwarten ließen (s. Abb. 15).

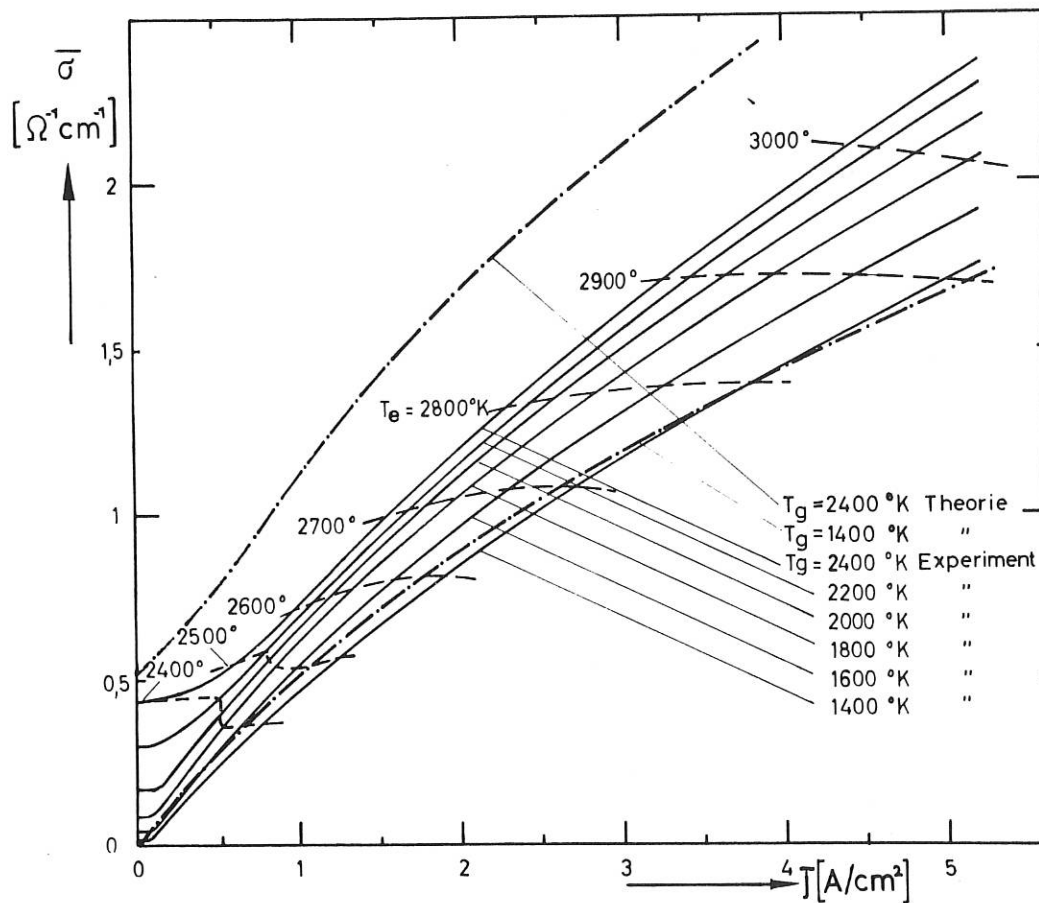


Abb. 15: Gemessener und berechneter Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit $\bar{\sigma}$ in Abhängigkeit von der elektrischen Stromdichte j bei verschiedenen Gastemperaturen. Kaliumzusatz 0,2 %.

4.5 Analytische Untersuchungen der inneren Charakteristiken von MHD-Generatoren

(L.L. Lengyel, M. Salvat)

Der Einfluß der Elektrodengeometrie und des Hall-Effekts auf den Innenwiderstand von MHD-Generatoren wurde mit Hilfe eines numerischen Verfahrens untersucht. Die Generatorgeometrie mit versetzten Elektroden wurde im Detail betrachtet (IPP 3/39). Es wurde festgestellt, daß die Innenwiderstände, die gleichen positiven und negativen Versetzungswinkeln entsprechen, gleich sind. Ein Vergleich der zwei Verteilungen in Abb. 16 zeigt, daß im Falle eines positiven Versetzungswinkels die Inhomogenitäten der Strom- und Potentialverteilungen vermindert sind, gleichzeitig wird aber der absolute Abstand zwischen den zwei Elektrodenkanten, an denen der Strom sich konzentriert, vergrößert. Im Falle eines negativen Versetzungswinkels werden die Inhomogenitäten verstärkt, die absolute Länge der Stromlinien dagegen verkürzt. Die Innenwiderstände sind für beide Fälle gleich.

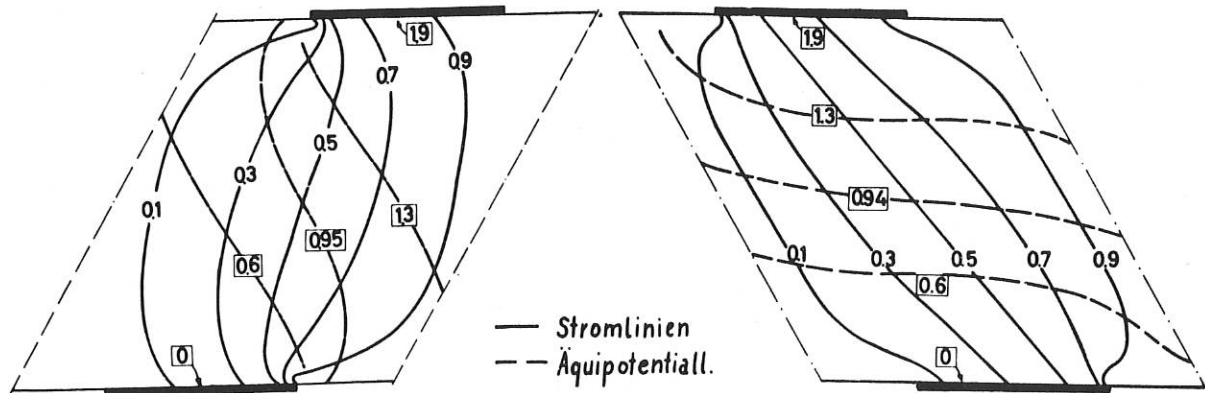


Abb. 16: Strom- und Potentialverteilungen für gleiche positive und negative Versetzungswinkel. — Stromlinien - - - Äquipotentiallinien

Die Ursache der Diskrepanz zwischen den verschiedentlich veröffentlichten Werten der Hall- und Faraday-Spannungen, die in experimentellen MHD-Generatoren gemessen wurden, und den Spannungen, die von idealisierten mathematischen Modellen erreicht worden sind, wurde mit Hilfe von numerischen Methoden untersucht. Die berechneten Ergebnisse zeigen, daß sich erhebliche Spannungsverluste allein durch den Einfluß der endlichen Segmentierung erklären lassen. Qualitätsfaktoren wurden für Faraday- und Hall-Generatoren definiert, welche man für die Auswertung der gemessenen Spannungs- und Stromwerte in allen drei Betriebsweisen (Generator-, Beschleuniger- und Bremsbetrieb) anwenden kann [IPP 3/49].

Die Verteilungen des Stromes und des elektrostatischen Potentials in Hall- und Faraday-Generatoren wurden für verschiedene Generatorgeometrien als Funktionen der Belastung berechnet [IPP 3/50].

4.6 Experimentelle Bestimmung der Stromdichteverteilung in einem simulierten MHD-Generator

(G. Brederlow, G. Dodel, L.L. Lengyel)

Die von F. Fischer (Jahresbericht 1965, IPP 3/49) durchgeführten Experimente zur Bestimmung der Stromdichteverteilung in einem simulierten MHD-Generator wurden fortgesetzt. Dazu wurde die Konstruktion des Meßkanals sowie die Einrichtung zur Messung der Stromdichteverteilung wesentlich verbessert. Es konnte somit die Dauer für die Aufnahme einer Verteilung wesentlich verkürzt und die Meßgenauigkeit erhöht werden.

Die von F. Fischer gefundenen Abweichungen der Stromdichteverteilungen auf den Elektroden, auf denen der Strom an der strömungsabwärts gelegenen Elektrodenseite ansetzt, wurden durch die bisherigen Messungen bestätigt. Wurden jetzt mehr Elektrodenpaare als von F. Fischer verwandt, dann ergaben sich Unterschiede, die das Verteilungsbild aber nicht wesentlich änderten. Die Messungen werden noch fortgesetzt.

4.7 Entladungen in Edelgasen ohne Alkali-Zusatz

(G. Hahn)

Es wurden Entladungen in reinen Edelgasen untersucht, um die Frage zu beantworten, ob MHD-Generatoren mit Edelgasen ohne Zusatz von Alkali-Metallen betrieben werden können.

In den kleinen MHD-Kanälen, die z.Zt. zur Verfügung stehen (Höhe $H \approx 1$ cm), ist die induzierte EMK ($v \cdot B \cdot H$) von der Größenordnung 10 V. Der Kathodenfall eines Bogens in reinen Edelgasen ist von der gleichen Größenordnung. Dadurch wird der Strom, den man mit der gegebenen EMK erhalten kann, erheblich verkleinert. Durch Anwendung hochemittierender Kathoden wird dieser Kathodenfall verringert und die Oberflächenemission homogener.

Es wurden zu diesem Zweck Metall-Kapillar-Kathoden untersucht. Die Versuche im ruhenden Edelgas ohne Magnetfeld haben gezeigt, daß man Stromdichten von etwa 100 A/cm^2 erreichen kann mit Kathodenfällen von etwa 2 V, und daß die Leitfähigkeit des Gases hinreichend groß ist ($\approx 100 \text{ Mho/m}$). Es zeigte sich weiter, daß die verwendeten Kathoden eine praktisch unbegrenzte Lebensdauer haben. Voraussetzung für ihre Anwendung ist jedoch, daß das Gas sehr sauber ist.

Es sind Experimente im Gange, die zeigen sollen, unter welchen Bedingungen mit diesen Kathoden Entladungen im strömenden Edelgas aufrechterhalten bleiben.

5. Mikrowellen

(G. Landauer, M. Tutter)

5.1 Ausbreitung elektroakustischer Wellen

(M. Tutter)

In der positiven Säule einer Argon-Niederdruckglimmentladung wurden sowohl parallel zur Rohrachse als auch senkrecht dazu zwischen zwei Sonden Wellen im GHz-Bereich transmittiert, welche sich durch ihr Dispersionsverhalten als elektroakustische Wellen identifizierten.

Die beobachtete Dispersion ließ sich durch die Gleichung:

$$\omega/\omega_p = 1 + 2 KT \cdot k^2 / (m \omega_p^2)$$

(Pavkovich u.a.) besser beschreiben als durch die Formel von Bohm und Gross:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + 3 KT \cdot k^2 / m$$

Aus dem Unterschied der Dämpfung der mit und entgegen der Elektronendrift laufenden Wellen wurde geschlossen, daß die Dämpfung durch Stöße erfolgt. Die Phase der Wellen am Ort ihrer Anregung durch das elektromagnetische Feld wurde extrapoliert.

5.2 Streuung von Mikrowellensignalen

(B. O'Brien)

Die Streuung von Mikrowellensignalen an einer positiven Säule einer Niederdruck-Quecksilber-Entladung wurde beobachtet und studiert. Diese Streuung wurde von Plasmawellen verursacht, welche entweder von außen mit einem (zweiten) Generator angeregt worden sind, oder in der Säule aufgrund der thermischen Bewegung vorhanden sind. Die Plasmawellen, die im homogenen Medium bei ca. $\omega = \omega_p$ zu erwarten sind, erfolgen in der begrenzten Säule bei mehreren Frequenzen wegen der Aufspaltung in Eigenfrequenzen (vergl. Randwertproblem).

5.3 Homogenes Cäsium-Plasma zur Untersuchung longitudinaler Wellen unter definierten Randbedingungen

(H.M. Mayer)

Technologische Schwierigkeiten (Materialfehler u.ä.) verhinderten bis jetzt die endgültige Installation der Apparatur. In der Zwischenzeit wurden folgende weitere Untersuchungen begonnen:

- a) Reflexion von Ladungsträgern an einer bewegten Langmuirschicht (Vibrationssonde).
- b) Modellmäßige Rechnungen zum Eindringen eines hochfrequenten Wechselfeldes in die Langmuirschicht.

Diese Rechnungen stehen im Zusammenhang mit früheren Untersuchungen über die Druckbilanz und die stoßfreie Dämpfung in einer Schicht, welche einem hochfrequenten Wechselfeld ausgesetzt ist ¹⁾.

5.4 Strahlungsmessung mit abgestimmten Mikrowellen-Empfangssonden

(G. Landauer)

Es wurden am Penning-Plasma vergleichende Strahlungsmessungen mit Empfangshörnern und abgestimmten Empfangssonden ($l \approx \frac{\lambda}{2}$, $\lambda = 3$ cm) durchgeführt. Die gemessenen Intensitäten unterschieden sich kaum, wenn die Sonde außerhalb des Plasmas oder im Plasma war. Dieses Ergebnis ist in der Deutung nicht klar. Es wurden größere Unterschiede in der empfangenen Leistung erwartet, da für Position der Empfangssonde außerhalb des Plasmas rein elektromagnetische Wellen, innerhalb des Plasmas jedoch longitudinale Wellen empfangen werden sollten. Im letzteren Fall hätte man Leistungen bis zum 10^2 fachen erwarten können.

1) H.M. Mayer, MPI-PA 25/64

5.5 Messungen an einem strahlerregten Plasma

(G. Landauer, G. Müller/Abt. 2)

Zu Beginn wurde versucht, am Cäsium-Plasma Alma II Mikrowellenstrahlung zu empfangen. Als Empfänger wurde ein 3 cm-Dicke-Radiometer verwendet. Das Ergebnis war, daß das Cs-Plasma ($T \approx 2000^\circ\text{K}$, $n_e \leq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) keine Strahlung aussendet, die mit dem Radiometer empfangen werden konnte.

Dieselbe Apparatur (Alma II) wurde dann verwendet, um ein strahlerregtes Plasma zu erzeugen. Auf einer Seite der Apparatur wurde eine Elektronenkanone eingebaut, die einen von einem axialen Magnetfeld ($B \approx 1,5 \text{ kG}$) geführten Elektronenstrahl erzeugt ($I_{\text{strahl}} \leq 0,2 \text{ A}$). Als Gas fand Helium Verwendung. In einer Querschnittsebene des Entladungsgefäßes wurde ein X-Band Mikrowellen-Empfangshorn und zwei senkrecht aufeinanderstehende, verschiebbare Sonden montiert.

Meßergebnisse:

Es konnten Strahlungsspektren mit Harmonischen der Elektronenzyklotronfrequenz $n\omega_e$ oder Harmonischen $\frac{1}{2} n\omega_e$ unter jeweils verschiedenen experimentellen Bedingungen gemessen werden. Voraussetzung für eine meßbare Ausstrahlung in beiden Fällen war, daß eine metallische Sonde in den Elektronenstrahl eingeführt wurde.

Die wichtigsten experimentellen Bedingungen waren

- a) für $n\omega_e$ -Emission: Magnetfeld B mit Spiegelkonfiguration in Nähe der Elektronenkanone; Zylindersonde oder ebene Sonde $\parallel B$ im Strahl; $p > 10^{-4}$ Torr.
- b) für $\frac{1}{2} n\omega_e$ -Emission: B homogen in Nähe der Elektronenkanone; Zylindersonde oder ebene Sonde $\perp B$; Sondenpotential = floating potential; $p < 1,5 \times 10^{-4}$ Torr.

Die beiden Experimente werden auf unterschiedliche Strahlungsmechanismen zurückgeführt. Die Strahlung $n\omega_e$ wird, wie in anderen Experimenten, als Anregung longitudinaler Wellen $\perp B$ erklärt. Die Strahlung $\frac{1}{2} n\omega_e$ scheint einer Instabilität zuzuordnen zu sein, die sich in einem System zweier einander entgegenlaufender Elektronenstrahlen erregt¹⁾. In unserem Experiment reflektiert die auf floating potential befindliche Sonde einen Teil des Strahles und übernimmt so die Funktion einer zweiten Elektronenkanone. [IPP 2/53 - 3/46].

5.6 FIG III

(F. Klan)

Die Untersuchung der Mikrowellenstrahlung der Penning-Entladung "FIG III" (vgl. Jahresbericht 1964) wurde fortgesetzt. Besondere Aufmerksamkeit galt dabei dem Zusammenhang zwischen der Emission der Harmonischen der Elektronenzyklotronfrequenz und der Elektronendichte. Mit Hilfe eines Mikrowelleninterferometers ($\lambda = 9 \text{ mm}$) und verschiebbarer Langmuirsonden wurde das radiale Profil der Elektronendichte in Abhängigkeit der Parameter Entladungsstrom, Neutralgasdruck (He) und Magnetfeld gemessen. Gleichzeitig wurde die Emission der Harmonischen aufgenommen. Man beobachtet ein sehr plötzliches Einsetzen und eine rapide Intensitätszunahme der Harmonischen, wenn die Elektronendichte einen kritischen Wert überschreitet, der durch die Hybrid-Resonanzbedingung $\omega^2 = \omega_p^2 + \omega_c^2$ gegeben ist ($\omega =$ Meßfrequenz; $\omega_p, \omega_c =$ Elektronenplasma bzw. -gyrofrequenz).

1) vgl. u.a. J. Olivain, C. Etievant, M. Perulli, J. de Physique, Tome 26, 505 (1965)

Ein weiteres Experiment galt der Frage nach der Korrelation zwischen Strahlung, die unter verschiedenen Winkeln senkrecht zum Magnetfeld emittiert wird. Eine solche echte Winkelkorrelation, die von der Ordnungszahl der betrachteten Harmonischen abhängen müßte, wurde nicht gefunden. Es wurde versucht, mit Hilfe von Langmuirsonden Elektronengeschwindigkeitsverteilungen zu messen. Die Auswertung der gemessenen Charakteristiken war u.a. durch die in der Penning-Entladung vorhandenen Instabilitäten sehr erschwert. Andererseits beobachtete man gerade in den instabilen Bereichen der Entladung intensitätsstarke Emission der Harmonischen. Im allgemeinen äußern sich die Instabilitäten durch Hochfrequenzschwingungen hoher Amplitude in einem breiten Frequenzbereich. Es zeigte sich jedoch, daß für spezielle Plasmaparameter ($p \approx 20 \mu$, $I \approx 150 \text{ mA}$, $B \approx 500 \text{ G}$) in Helium eine periodische Instabilität mit einer Frequenz von ca. 1 kHz einsetzt. Damit korreliert ist die Ausstrahlung der Harmonischen. Die Untersuchungen hierüber werden fortgesetzt.

5.7 Glimmentladung mit verschiebbaren Elektroden

(F. Leuterer)

Im Berichtsjahr wurde ein Experiment aufgebaut, mit dem die Anregung von Harmonischen der Elektronenzyklotronfrequenz in einer Glimmentladung untersucht werden kann. Die Emission der Harmonischen, Mikrowellentransmission und Sondencharakteristiken zur Ermittlung der Elektronengeschwindigkeitsverteilung sollen in einer Querschnittsebene der Entladung gemessen werden. Insbesondere soll mit diesem Experiment eine eventuelle Abhängigkeit der genannten Eigenschaften

a) von der Kathodenheizleistung und

b) vom Abstand der Meßebeine von der Kathode (bei gleichbleibender Entladungslänge) untersucht werden. Es ist zu erwarten, daß die Elektronengeschwindigkeitsverteilung der Glimmentladung vom Abstand von der Kathode und von der Kathodenheizleistung abhängt. Nach den bestehenden Kenntnissen über den Mechanismus der Anregung der Zyklotronharmonischen in Plasmen soll die Elektronengeschwindigkeitsverteilung wesentlich die Intensität der Anregung bestimmen. Damit wäre also eine Abhängigkeit z.B. der ausgestrahlten Leistung vom Abstand Kathode - Meßebeine zu erwarten.

Es wurde daher ein Versuch aufgebaut, der es gestattet, die ganze Entladung an einer feststehenden Meßebeine (Möglichkeiten für Anbringung von zwei Mikrowellenhörnern und zwei Sonden) vorbei zu verschieben. Außerdem wurde auf eine leichte Austauschbarkeit der Kathode Wert gelegt.

Technische Daten:

Gefäß: Glas, 50 mm \emptyset , Länge ca. 130 cm, verschiebbare Entladungslänge ca. 50 cm.

Kathode: direkt geheizte, ebene Oxydkathode, ca. 25 mm \emptyset , Entladungsstrom $\leq 3,5 \text{ A}$.

Magnetfeld: 18 Spulen Sp 182, $B \leq 2500 \text{ G}$, Welligkeit $< 1 \%$ über 60 cm Länge.

Erste Messungen in Helium zeigten eine Emission von Harmonischen im Druckbereich $10^{-3} - 10^{-2} \text{ Torr}$ und eine Zunahme der Zahl der beobachteten Harmonischen mit wachsendem Entladungsstrom (1 - 3,5 A). Ferner wurde ein Einfluß der Heizung der Kathode auf die Emission beobachtet.

5.8 Wechselwirkung zwischen stehenden transversalen elektromagnetischen Wellen und Plasma
 in einem Fabry-Perot-Resonator im Frequenzbereich von 35 bis 37 GHz (8 mm).

(P. Javel)

Es wurden experimentelle und theoretische Untersuchungen begonnen, um den Einfluß der Kräfte auf ein Plasma zu studieren, die durch den Gradienten eines UHF-Feldes verursacht werden. Die Cut-Off-Frequenz des Plasmas ist dabei viel kleiner als die Frequenz des angelegten Feldes.

Für die Experimente wurde ein Fabry-Perot-Resonator für den 8 mm-Bereich gebaut, der bei einem Teil der Untersuchungen als "Meßgerät" benützt werden soll (Kleine Leistung = Bereich schwacher Wechselwirkung), bei einem anderen Teil der Messungen soll der Resonator bei höheren Leistungen (10 Watt) selbst als "Untersuchungsobjekt" betrachtet werden. - Für den Resonator wurden Güten von 500 bis 1000 gemessen.

Zur Erzeugung des Plasmas im Hohlraum wurde von der Abt. Technik ein Generator für Frequenzen von 5 bis 20 MHz (mit 200 Watt maximaler Leistung) gebaut. Die Ankopplung an das Plasma erfolgte kapazitiv mit Hilfe der Resonatorspiegel.

Zur Messung der Elektronendichte und -temperatur im Plasma wurden zylindrische Langmuirsonden gebaut.

Erste Versuche wurden unternommen, den dynamischen Gleichgewichtszustand zwischen Feld und Plasma im Hohlraum theoretisch zu erfassen. Dabei wurde die V.K.B.-Methode auf den ein-dimensionalen Fall angewandt und periodische Lösungen des Reflexionsfaktors des mit Plasma gefüllten Hohlraumes gesucht, die als Folge der Wechselwirkung zwischen Plasma und Feld zu erwarten sind.

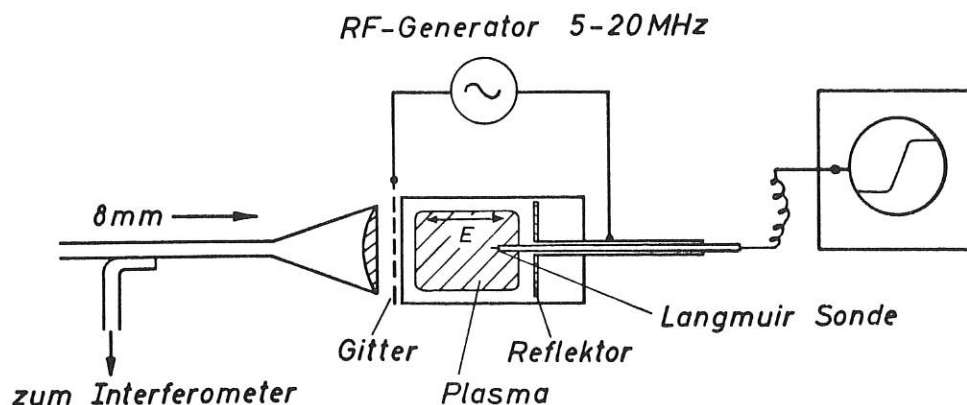


Abb. 17: Schema des Experiments

5.9 Anwendung der Mikrowellentechnik auf physikalisch-chemische und biologische Fragen

(O. Gehre, N. Kaiser)

Mit der schon früher beschriebenen Brückenmethode im 3 cm-Band mit hochempfindlichem Detektor (B. O'Brien) wurde die Messung der DK wässriger Hämoglobin- und Methämoglobinlösungen durchgeführt (F. Keilmann¹⁾). Die deutlichen Meßwertdifferenzen für diese beiden Substanzen bei 10 GHz, die auf dem Wege über die Messung der Hydrathüllen in diesem Frequenzbereich der Wasserdispersion ermittelt werden konnten, müssen noch weiter untersucht werden, bevor eine sichere Aussage gemacht werden kann, daß es sich hierbei um eine Veränderung der Bindungszustände der Eisenatome handelt.

Um die Frequenzabhängigkeit dieser Meßwerte feststellen zu können und um die apparativen Voraussetzungen weiter in Richtung auf kürzere Wellenlängen auszubauen, wurde der oben genannte Brückenaufbau im 8 mm- und 4 mm-Band wiederholt und die jeweils dazugehörigen Meßküvetten entwickelt. Es konnte mit diesen beiden Brücken eine annähernd gleiche Meßempfindlichkeit wie mit der 3 cm-Brücke erreicht werden.

Eine weitere Aufgabe bestand darin, die Meßbrücken derart weiterzuentwickeln, daß ihre Anwendung jeweils über das ganze Hohlleiterband durchführbar wurde, um dadurch eine Verbesserung der Übersicht über die Meßwerte auf dem Frequenzband zu erreichen. Das Durchstimmen einer derartigen Brücke über das jeweilige Hohlleiterband bei gleichzeitiger Messung von Dämpfung und Phasenlage bereitete zunächst erhebliche Schwierigkeiten, da die Mikrowelleneigenschaften der Hohlleiterbauteile meist sehr frequenzabhängig sind und es außerdem notwendig ist, den Aufbau mit gleichen elektrischen Längen sowohl in der Meß- und der Detektorbrücke als auch in der Referenzleitung auszuführen. Ein derartiger, einwandfrei arbeitender Aufbau konnte jetzt im X-Band durchgeführt werden, wobei gleichzeitig eine relativ hohe Empfindlichkeit erreicht wurde.

1) F. Keilmann, Dielektrische Eigenschaften wässriger Hämoglobinlösungen im Mikrowellenbereich, Diplomarbeit des Physik Dep. der TH München

1. Gleichgewicht zwischen Plasma und Magnetfeld1.1 Symmetrische magnetohydrostatische Gleichgewichte

(P. Merkel)

Die Untersuchung axialsymmetrischer magnetohydrostatischer Gleichgewichte und ihrer Stabilität wurde abgeschlossen. Die Ergebnisse sind im Laborbericht IPP 6/48 und im Euratom Symposium on Theoretical Plasma Physics, Varenna 1966, veröffentlicht. Es wurde begonnen, magnetohydrostatische Gleichgewichte in helischer Symmetrie für großes β zu studieren.

1.2 Toroidales Gleichgewicht bei kleinem β

(D. Lortz, A. Schlüter)

Besteht das Magnetfeld aus dem toroidalen Magnetfeld mit kleinem Zusatzfeld und existieren torusartig ineinandergeschachtelte magnetische Flächen, dann ist die Größe $V''(\phi)$ (V : Volumen der den Fluß ϕ einschließenden magnetischen Fläche) im allgemeinen negativ. Ausgedehnte numerische Rechnungen für größere Rotationstransformationen lieferten ebenfalls viele Konfigurationen mit negativem V'' . Numerische Integration der Feldlinien von analytischen Vakuumfeldern (durchgeführt von H. Welter) zeigten jedoch, daß im allgemeinen keine magnetischen Flächen existieren. Linearisiert man die magnetische Abbildung eines Meridionalschnittes auf sich in der Nähe einer geschlossenen Feldlinie, so erhält man eine notwendige Bedingung dafür, daß diese Feldlinie zu einer magnetischen Fläche gehört. Diese Bedingung konnte numerisch durch bestimmte Feldkonfigurationen mit hoher Genauigkeit befriedigt werden. In diesem Falle war die sog. q-Bedingung, $\int dl/B = \text{const}$, mit etwa derselben Genauigkeit erfüllt.

1.3 Toroidale Felder mit negativem V''

(G. Knorr, E. Rebhan)

Zur Untersuchung der Stabilitätseigenschaften von Vakuumfeldern (klein- β -Näherung) wurden Lösungen der Laplacegleichung in Toruskoordinaten zugrunde gelegt, die eine kreisförmige Feldlinie als magnetische Achse haben. Durch Potenzreihenentwicklung nach dem Achsenabstand wurden magnetische Oberflächen konstruiert und die Achsenwerte von ι und V'' berechnet. Hierzu mußte bis zur dritten Ordnung gegangen werden. In einem einfachen Spezialfall konnte die Entwicklung bis zu beliebig hohen Ordnungen untersucht werden, wobei sich ergab, daß für alle rationalen Achsenwerte von $\iota/2\pi$ Resonanzen auftreten, die die magnetischen Oberflächen zerstören. Dieses Phänomen wird im allgemeinen auch bei beliebigen Feldern auftreten und hängt vermutlich mit der Zerstörung magnetischer Oberflächen durch Streufelder zusammen, wie sie in einer Reihe hauptsächlich russischer Arbeiten kürzlich behandelt wurden. In den untersuchten Magnetfeldern wurden die sie erzeugende Stromverteilung auf einen Ringtorus berechnet und die Feldeigenschaften direkt mit den Strömen verknüpft. Es zeigte sich, daß Felder mit beliebig negativem V'' und hinreichend großem ι durch relativ einfache Stromanordnungen erzeugt werden können. Um die Bedeutung des V'' -Kriteriums experimentell überprüfen zu können, wäre es wünschenswert, das Magnetfeld

zwischen positiven und negativen Werten von V'' variieren zu lassen. Die hierzu erforderlichen Strombelegungen können leicht angegeben werden. Es ist sehr wahrscheinlich, daß sie hinreichend genau dadurch approximiert werden können, daß man sogenannte helische $\ell = 2$ und $\ell = 3$ Wicklungen übereinander anbringt und in diesen unabhängig die Stromstärke variiert. Die quantitativen Verhältnisse müßten numerisch ermittelt werden.

1.4 Geometrie von Feldlinien in magnetischen Flächen

(J. Lindner, D. Lortz)

Im Anschluß an die Integration der Feldliniengleichungen bis zur 2. Ordnung des Verhältnisses \mathcal{E} von Zusatzfeld zum Grundfeld, wobei das Grundfeld ein beliebiges Magnetfeld mit geschlossenen Feldlinien ist (s. Jahresbericht 1965, Phys. Fluids 10, 630 (1967)) entstand die Frage, welche differentialgeometrischen Eigenschaften die Feldlinien in magnetischen Flächen auszeichnen. Es wurden insbesondere allgemeine toroidale Felder - dargestellt durch Torusfunktionen - untersucht und der Verlauf der geodätischen, Krümmungs- und Asymptotenlinien berechnet. Der Zusammenhang zwischen der geodätischen Krümmung K_g und der Richtungsableitung des Integrals $q = \oint \frac{de}{B}$ senkrecht zu den Feldlinien in einer magnetischen Fläche $\Psi = \text{const}$ wird für eine geschlossene Feldlinie durch die Formel $\frac{dq}{d\chi} = \oint \frac{|\nabla \Psi|}{B^2} K_g ds$ gegeben. Die Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen.

1.5 Zum q-Problem

(K.U. v. Hagenow a), D. Lortz b))

Das in 1.4 erwähnte numerische Ergebnis legt die Frage nahe, ob die für die Entwicklung des toroidalen Gleichgewichtes nach β notwendige Bedingung $\oint \frac{de}{B} = \text{const.}$ auf Flächen mit rationalem ℓ für Vakuumfelder dann erfüllt ist, wenn magnetische Flächen existieren.

a) Es wurde das Vakuumfeld in der Nachbarschaft einer vorgegebenen, geschlossenen Feldlinie durch Potenzreihenentwicklung nach C. Mercier bestimmt. Die lokale Bedingung, daß die betrachtete Feldlinie in einer Fläche liegt, läßt sich befriedigen, ohne daß der Wert von $dq/d\chi$ d.h. die Ableitung von q in der Fläche, festliegt.

b) Gibt man sich eine analytische magnetische Fläche vor, so läßt sich das Feld in die Umgebung eindeutig fortsetzen, falls es auf der Fläche vorgegeben ist. Gibt man jetzt die Feldlinien auf der Fläche geschlossen vor, so hängt $dq/d\chi$ außer von geometrischen Größen in der Fläche auch noch vom Betrag des Feldes ab, ist also durch Vorgabe der Linien allein nicht bestimmt.

Beide Betrachtungen benutzen nur die Umgebung einer Linie resp. Fläche, ohne die Regularität des Feldes im ganzen Innern der magnetischen Fläche zu benutzen. Eine Beantwortung der Frage scheint also nur durch ein Gegenbeispiel oder durch Betrachtung des vollen Randwertproblems möglich zu sein.

1.6 Stationäre Gleichgewichte mit Dissipation

(H.P. Zehrfeld)

Es wurde das stationäre Gleichgewicht eines isothermen Plasmas niedriger Dichte in einer Magnetfeldkonfiguration untersucht, von der eine spezielle Realisierung unter dem Namen Octopol bekannt geworden ist. Benutzt wurden die üblichen hydromagnetischen Gleichungen für das stationäre Gleichgewicht, im Ohmschen Gesetz wurde der Hall-Term vernachlässigt. Unter der Annahme, daß endliche Leitfähigkeit und Viskosität in gleicher (erster) Ordnung zu berücksichtigen sind, konnte gezeigt werden, wie die Gleichgewichtslösung bis zur einschließlich ersten Ordnung gewonnen wird. Die Größe des durch die endliche Leitfähigkeit bedingten Netto-Massenflusses aus dem Einschlußbereich des Plasmas heraus hängt noch von der Lösung eines Systems gewöhnlicher Differentialgleichungen für drei Funktionen des Magnetfeldflusses ab, das wegen der vollen Berücksichtigung des Trägheitsterms sehr kompliziert ist.

Im Rahmen von Überlegungen, die das Problem der Bestimmtheit dissipativer stationärer Gleichgewichte und deren (umstrittene) Ableitbarkeit aus einem Variationsprinzip betreffen, wurde die Kovarianz hydromechanischer und hydromagnetischer Bewegungsgleichungen bezüglich zeitabhängiger Koordinatentransformationen diskutiert. Die kovariante Formulierung solcher Gleichungen in zeitabhängigen krummlinigen Koordinaten ist mit Hilfe eines Kalküls möglich, der der expliziten Verwendung von Begriffsbildungen aus der Theorie der differenzierbaren Mannigfaltigkeiten und der Riemannschen Geometrie nicht bedarf.

1.7 Temperaturprofil einer toroidalen Entladung

(W. Feneberg)

Es wurde eine Arbeit begonnen, welche sich mit der Bestimmung des Temperaturprofils in einer toroidalen Entladung beschäftigt. Im Gegensatz zu einer linearen Entladung steht nämlich der Temperaturgradient nicht exakt senkrecht auf der magnetischen Fläche. Die Komponente des Temperaturgradienten in der magnetischen Fläche führt zu einem erhöhten Energieverlust von der Ordnung $\frac{4\pi^2}{L^2}$ (L = Rotationstransformation) gegenüber dem geraden Fall.

2. Stabilität

2.1 Toroidales Gleichgewicht und Stabilität bei $\beta = 1$

(H. Tasso ⁺)

Gemeinsam mit C. Mercier ⁺⁺) wurde ein toroidales, nichtrotationssymmetrisches MHD Gleichgewicht mit Oberflächenströmen und seine Stabilität durch Entwicklung nach dem Aspektverhältnis untersucht. Analog zu früheren Untersuchungen von W. Newcomb und C. Mercier über die Verhältnisse in der Nähe der magnetischen Achse treten auch hier Singularitäten für rationale Werte der Rotationstransformation auf, die das Stabilitätsverhalten stark beeinflussen und eine Stabilisierung über die Kruskal-Grenze hinaus gestatten. [EUR-CEA-FC 388 (1966)].

2.2 Qualitative stabilisierende und destabilisierende Effekte in der makroskopischen Theorie

a) (P.P.J.M. Schram ⁺), H. Tasso ⁺)

Es wurde im Rahmen der 2-Flüssigkeitstheorie mit vollständigem Drucktensor bei endlichem β gezeigt, daß die magnetische Viskosität und die Ionen- Ionen-Stöße ein MHD-stabiles Plasma nicht destabilisieren können. Bestimmte MHD Austauschstörungen werden durch die magnetische Viskosität sogar stabilisiert. Die fehlenden Symmetrieeigenschaften des dem Hall-Term entsprechenden Stabilitätsoperators verhinderten eine vollständige Diskussion des Problems (Nucl. Fusion 6, 1966).

b) (H. Tasso ⁺)

Für ein toroidales Plasma mit Oberflächenströmen ließ sich zeigen, daß der Hall-Term alleine ein MHD-stabiles Plasma nicht destabilisieren kann. (Erscheint demnächst in Nucl. Fusion).

2.3 LIMPUS-Konfiguration

(H. Wobig)

Ausgehend vom Energieprinzip der Magnetohydrodynamik wurde die Stabilität eines gewellten Thetapinches bei Volumenströmen untersucht. Die Gleichungen für die Normalschwingungen wurden hierzu im Rahmen einer Störungsrechnung gelöst, wobei als Entwicklungsparameter $\epsilon = \frac{2\pi a}{L}$ diente. ($a = \frac{1}{2}(r_{max} - r_{min})$, L = Länge einer Gleichgewichtsperiode). ϵ ist somit ein Maß für die Welligkeit des Gleichgewichts. Für Schwingungen mit kleinen Wellenlängen quer zum Magnetfeld ergab sich Instabilität. Diese Störungen sind im wesentlichen auf die Gebiete ungünstiger Krümmung der Feldlinien lokalisiert. Die Anwachsraten sind:

$$1) \quad \omega^2 \simeq 3\epsilon^2 \frac{2kT_i}{m_i} \frac{m}{r_0} \left(1 + O\left(\frac{m}{a}\right) \right), \quad a \gg 2m$$

$$2) \quad \omega^2 \simeq 3\epsilon^2 \frac{2kT_i}{m_i} \frac{1}{r_0} \frac{a}{2} \left(1 + O\left(\frac{a}{m}\right) \right), \quad a \ll 2m$$

⁺) EURATOM

⁺⁺) CEA Fontenay-aux-Roses.

m_i = Ionenmasse

r_0 = mittlerer Plasmaradius

$$\frac{2}{\alpha} = \frac{d}{r_0}, \quad d \text{ ist ein Maß für die Dicke der Randschicht.}$$

2.4 Nullpunktinstabilität im Quadrupolfeld

(H. Wobig)

Ausgehend von der Vlasovgleichung wurde in einem von zwei Drähten erzeugten Magnetfeld die Instabilität vom "Spiegeltyp" ¹⁾ untersucht. Mit Hilfe der Theorie der Nachbargleichgewichte ^{1,2)} konnte ein kritisches β abgeleitet werden, oberhalb dessen die Umgebung des Nullpunkts instabil wird. Es ergab sich $\beta_c \approx r_0^2/R_0^2$, wobei r_0 ein Maß für die Dichteabfalllänge ist, $r_0 = n_0/|\nabla n_0|$, und $2R_0$ der Abstand der felderzeugenden Drähte. Die neutrale Störung (Nachbargleichgewicht) ist verwandt mit der "tearing-mode" eines ebenen Schichtpinches und beschreibt ein Aufbrechen und Sichneuerbinden in der Nachbarschaft des Nullpunkts.

2.5 Minimum-B-resistente driftwellenartige niederfrequente Verlustkegelinstabilitäten

(R. Saison ⁺), H.K. Wimmel)

Die im Jahresbericht 1965 beschriebene theoretische Untersuchung von Minimum-B-resistenten elektrostatischen Driftinstabilitäten in stoßfreien inhomogenen Magnetoplasmen wurde fortgesetzt.

Es wurde zunächst die Existenz von driftwellenartigen niederfrequenten Verlustkegelinstabilitäten für TAYLOR-artige Minimum-B-Gleichgewichte, $f_0 = f_0(W, \mu)$, nachgewiesen. Dabei wurde die Näherung gerader magnetischer Feldlinien verwendet. Im homogenen Magnetoplasma gehen die Instabilitäten in reine Verlustkegelinstabilitäten mit $\text{Re } \omega = 0$ über. Dieser Teil der Untersuchung wurde in der Zeitschrift für Naturforschung publiziert [72].

Genauere Information über Anwachsrate und Frequenz der neuen Instabilitäten wurde für den Fall von TAYLOR-Gleichgewichten durch Reihenentwicklung der Dispersionsgleichung und Lösung für charakteristische Test-Gleichgewichte und -Störungen gewonnen.

In einem weiteren Teil der Untersuchung, welcher keinen Gebrauch von der erwähnten Reihenentwicklung macht, wurde die Stabilitätsgrenze von TAYLOR-Gleichgewichten anhand des Nyquist-Diagramms diskutiert und für charakteristische Sonderfälle bestimmt. Die notwendigen Bedingungen für Instabilität lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Die Gleichgewichts-Verteilungsfunktionen für $\mathcal{V}_{i\perp}$ und/oder $\mathcal{J}_{e\perp}$ müssen ein hinreichend schmales Maximum für $\mathcal{V}_{i\perp} \neq 0$ besitzen. Der Wellenvektor k muß einer Bedingung $k_{\perp} R \approx N\pi$ ($N =$ ganze Zahl) genügen, wobei R der häufigste Gyroradius der Teilchensorte mit nicht-monotoner Verteilung ist. Die Teilchendichte muß einen kritischen Wert übersteigen, der von der Feldstärke B und anderen Parametern abhängt; eine charakteristische Bedingung für die Teilchendichte ist: $\omega_{pi} > 5 \Omega_i$; Es gibt auch Parameterbereiche, in welchen die Teilchendichte außerdem unterhalb eines zweiten kritischen Wertes bleiben muß. Die Stabilitätsbedingungen hängen, soweit überhaupt, nur schwach von der Inhomogenität des B-Feldes ab.

1) D. Pfirsch, Lab.-Bericht MPI/PA/3-62.

2) G. Laval et al., IAEA Proc. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Research, Culham 1965, Vol. II, 259, Wien 1966

+) EURATOM

Die in diesem und im vorigen Abschnitt erwähnten Ergebnisse wurden bisher in Form einer Kurznotiz in Physics Letters publiziert [73].

Im Berichtszeitraum wurden außerdem zwei Kurzvorträge auf Tagungen gehalten [57], [58] sowie ein Kolloquiumsvortrag.

Die untersuchten Instabilitäten können möglicherweise in Spiegel- oder Minimum-B-Maschinen auftreten, wenn nicht-monotone ψ -Verteilungen, insbesondere solche der Ionen, durch Teilchen-Einschuß oder Gyroheizung erzeugt werden. Wir haben deshalb damit begonnen, auch allgemeinere Gleichgewichte (nicht vom TAYLOR-Typ) in Magnetfeldern mit gekrümmten Feldlinien zu untersuchen. Die bisherigen (vorläufigen) Ergebnisse beziehen sich auf die Herleitung der Dispersionsgleichung für diese Fälle und auf Aussagen über die zugehörigen Nyquist-Diagramme.

3. Plasmadynamik

3.1 Numerische Rechnungen zum Thetapinch

(H. Fisser)

Die Rechnungen mit dem neu geschriebenen Thetapinch Programm, in dem Differenzgleichungen benutzt werden, welche die Erhaltungssätze lokal erfüllen, wurden aufgenommen. Sie zeigten u.a., daß nach 6000 Zeitschritten die am Plasmarand geprüfte Energiebilanz bis auf einen relativen Fehler von 2.5 % erfüllt war; (Abweichung bezogen auf die thermische Energie des Plasmas).

Umfangreiche Versuche, mit variablem räumlichem Netz und weniger Punkten im Ort zu rechnen, mußten ergebnislos abgebrochen werden, da die Interpolation der Variablen auf das jeweils neue Netz zu einer starken künstlichen Diffusion der Variablen führte.

Eine bis zur Zeit $t = 2.5 \mu\text{s}$ fortgeführte Rechnung mit einem Parametersatz des ISAR I - Experimentes ergab Ionentemperaturen, die deutlich kleiner waren als die Werte, die man durch sinusförmige Extrapolation aus der Steigung bei $t = 0$ erhält. Numerische Instabilitäten, die in der Stromschicht auftreten, machen bis jetzt ein Weiterrechnen bis zum Feldmaximum unmöglich.

3.2 Numerische Plasmadynamik

(F. Hertweck, W. Schneider)

Es wurde ein neues Verfahren entwickelt, um die Gleichungen der Magnetohydrodynamik zu lösen. Der wesentlichste Unterschied dieses Verfahrens zu anderen ist, daß die Magnetfeldlinien als Koordinatenlinien benutzt werden. Da sie sich zeitlich ändern, erhält man eine Beschreibung der Dynamik in einem krummlinigen schiefwinkligen und zeitabhängigen Koordinatensystem. Die sich daraus ergebenden Komplikationen für die Numerik lassen sich jedoch beherrschen. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß Transporterscheinungen längs der Feldlinien, insbesondere Wärmeleitung, mit größerer Genauigkeit berücksichtigt werden können.

3.3 Liner-Problem

(P. Merkel)

Für eine Pinchmaschine mit komplizierter Magnetfeldgeometrie (Limpus, Helix, Torus) kann es wichtig sein, daß für die Zeit der ersten Kompression das komprimierende Magnetfeld von höherer Symmetrie ist, als das für das Gleichgewicht notwendige Magnetfeld, daß also etwa beim Limpus das komprimierende Magnetfeld zylindersymmetrisch ist.

Es wurde der Vorschlag untersucht, am Beispiel einer Limpusanordnung, ob sich ein solches Verhalten durch eine zylindersymmetrische Spule, die zwischen Plasma und Limpusspule liegt, verwirklichen läßt. Die Leitfähigkeit dieser Spule sollte so gewählt sein, daß das Magnetfeld für die Zeit der ersten Kompression durch die Zusatzspule und für spätere Zeiten durch die Limpusspule bestimmt ist.

4. Wellen und Strahlung

4.1 Pulsstimulierte Strahlung

(W.H. Kegel)

Die während eines USA-Aufenthaltes begonnenen Arbeiten über pulsstimulierte Strahlung in Plasmen wurden fortgesetzt.

Für das Auftreten von "Echos" sind eine Spreizung der Resonanzfrequenzen der Elektronen sowie die Wirksamkeit gewisser Nichtlinearitäten notwendig. Eine dieser Nichtlinearitäten ist eine Energieabhängigkeit der Resonanzfrequenzen. Zusammen mit R.W. Gould (während des Sommers Gast am MPI für Extraterrestrische Physik) wurde der Einfluß statischer, elektrischer und magnetischer Feldgradienten untersucht, durch welche die Resonanzfrequenzen energieabhängig werden. Insbesondere zeigen Abschätzungen, daß die elektrostatischen Felder, die in Randschichten auftreten, u.U. die wesentliche Ursache für das Auftreten von Echos sein können. Ein weiterer Mechanismus, der zusammen mit A. Schlüter untersucht wurde, beruht darauf, daß ein Elektron, das Energie aufnimmt, auch Impuls aufnimmt, was zu einer Versetzung des Gyrationenzentrums führen kann. In einem inhomogenen Magnetfeld wird dadurch die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Energieaufnahme geändert.

Weiter wurde untersucht, wie lange die Rückwirkung der Strahlungsfelder der Teilchen auf ihre Bewegung vernachlässigt werden kann. Die kritische Zeit ergibt sich zu

$$t_{krit} = \frac{\omega \cdot \lambda}{\omega_p^2 L \pi} \quad (L = \text{Plasmadimension})$$

Für dünne Plasmen ($n_e = 10^9 \text{ cm}^{-3}$) ist mit $L = 1 \text{ cm}$, $\lambda = 3 \text{ cm}$, $t_{krit} \approx 16 \text{ nsec}$, was ungefähr der oberen Grenze der verwendeten Pulslängen und auftretenden Echolängen entspricht. In dichteren Plasmen, wie in einer Q-Maschine, hingegen ist t_{krit} sehr viel kürzer, d.h. das Strahlungsfeld der Teilchen muß berücksichtigt werden.

4.2 Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit Plasmen

(A. Salat)

Die Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit einem vollionisierten Plasma wurde in zwei Richtungen weiter untersucht:

a) Luxemburgeffekt. Dabei heizt eine niederfrequent modulierte elektromagnetische Welle durch Coulombstöße das Plasma im Takt der Modulation auf. Eine zweite, nicht modulierte Welle erfährt dadurch beim Durchlaufen des Plasmas eine teilweise Modulation, deren Stärke ein Maß für die Stoßfrequenz im Plasma ist. Anwendungen zur Plasmadiagnostik wurden untersucht.

b) Absorption durch Fluktuationen. Der von dem Feld \underline{E} einer elektromagnetischen Welle getriebene Strom \underline{j} leistet in der Zeiteinheit die Arbeit $\underline{j} \cdot \underline{E}$. Gleichzeitig modifiziert die Welle die mikroskopischen Plasmafluktuationen $\delta \underline{E}, \delta \underline{j}$, wodurch eine mittlere zusätzliche Arbeit $\langle \delta \underline{j} \cdot \delta \underline{E} \rangle$ geleistet wird. Sie führt zu einer zusätzlichen effektiven Absorptionskonstante, deren Berechnung begonnen wurde.

4.3 Wechselwirkung von Laserlicht mit Plasmen

(H. Hora, D. Pfirsch⁺), A. Schlüter)

Zur Theorie der sehr hohen Beschleunigung lasererzeugter Plasmen dem Laserlicht entgegen und in Richtung des Laserlichtes wurde ein nichtlinearer Wechselwirkungsmechanismus zwischen elektromagnetischer Welle und Plasma untersucht. Für senkrechten Lichteinfall auf ein eindimensional geschichtetes inhomogenes Plasma ergab sich als erster Näherungsschritt zur nichtlinearen Lösung der Zweiflüssigkeitgleichungen oder durch direkte Anwendung einer Bewegungsgleichung, die aus dem Impulsstromdichtetensor gebildet wird, eine Kraftwirkung in Richtung abnehmender Plasmadichte. Die Grenzen der Betrachtungen liegen in der Anwendbarkeit der WBK-Näherung. Unter extremen Bedingungen können durch diese Kraftwirkung Plasmageschwindigkeiten entstehen, die mit den gemessenen hohen Werten vergleichbar sind.

4.4 Relativistische nichtlineare Wechselwirkung kalter Plasmen mit elektromagnetischen Wellen

(W. Lünow)

Das Verhalten eines vollionisierten, aus einer einzigen Atomsorte bestehenden Plasmas, das im wesentlichen elektromagnetischen Kräften (Wellen) unterliegt, wurde analytisch behandelt: Gegen die elektromagnetischen Kräfte sind Kraftwirkungen vernachlässigt, die von den Spannungs-(Druck)-Tensoren der Ionen und Elektronen, der Gravitation und der Wechselwirkung zwischen Ionen und Elektronen herrühren. Im Vergleich zu den Phasengeschwindigkeiten longitudinaler Plasmawellen müssen die mittleren thermischen Teilchengeschwindigkeiten genügend klein sein (LANDAU-Dämpfung). Das Problem wird durch Bewegungs- und Feldgleichungen in relativistischer Fassung beschrieben.

Aus den allgemeinen Grundgleichungen folgt ein spezialisiertes Gleichungssystem, das Wellenlösungen liefert, in denen sämtliche Partialwellen die gleiche räumlich-zeitlich konstante Phasengeschwindigkeit besitzen. Dieses Gleichungssystem ergibt

1. Eine strenge analytische periodische Lösung der nichtlinearen Ausgangsgleichungen. Die Lösung beschreibt eine transversale zirkular polarisierte elektromagnetische Welle und gilt für Phasengeschwindigkeiten, die größer als die Vakuumlichtgeschwindigkeit sind. Das relativistische Korrekturglied der Dispersionsbeziehung enthält den exakten Ionen- und Elektroneneinfluß.

Eine analoge Lösung folgt für ein vollionisiertes Plasma, das aus Elektronen und N ($= 1, 2, 3, \dots$) Ionensorten besteht. Die einzelnen Ionensorten laufen (ohne konstantes Magnetfeld!) phasengleich auf Kreisbahnen um. Der Betrag der Bahngeschwindigkeit ist für jede Ionensorte konstant. Die einzelnen Ionensorten können je nach Ladung und Masse unterschiedliche Beträge der Bahngeschwindigkeit und damit auch unterschiedliche Kreisbahnradien haben. Auf diese Weise lassen sich Relativgeschwindigkeiten zwischen

⁺) Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik

verschiedenen Ionensorten oder zwischen Ionen und Neutralgas (letzteres wird vom Feld der Welle nicht beeinflusst) erzeugen.

2. Eine strenge analytische periodische Lösung der unter Vernachlässigung der Ionenschwingung gewonnenen nichtlinearen Ausgangsgleichung. Die Lösung beschreibt eine longitudinale elektrische Welle.

Die Phasengeschwindigkeit der Welle muß größer als der maximale Absolutwert der durch das elektrische Feld verursachten longitudinalen Elektronen-Geschwindigkeit sein. Diese exakte Aussage ist das Pendant zu einer entsprechenden aus der LANDAU-Dämpfung resultierenden Beziehung zwischen Phasengeschwindigkeit und mittlerer thermischer Elektronen-Geschwindigkeit.

3. Eine stationäre Näherungslösung (bis zur 3. Ordnung) der nichtlinearen Ausgangsgleichungen für die simultane Verkoppelung von Plasma, transversalen und longitudinalen Wellen. Sie gilt für Phasengeschwindigkeiten, die größer als die Vakuumlichtgeschwindigkeit sind. Relativistische Effekte treten in der 3. Ordnung auf. Die Ionenschwingung bleibt unberücksichtigt, da sie die Lösung erst von der 4. Ordnung an beeinflusst.

Rein longitudinale elektrische Wellen haben eine konstante Plasma-Elektronen-Driftgeschwindigkeit von 2. Ordnung zur Folge: Die Plasma-Elektronen strömen den Wellen entgegen.

Eine transversale linear polarisierte elektromagnetische Welle von 1. Ordnung ist mit einer elektromagnetischen Welle gleicher Polarisation von 3. Ordnung verbunden: Die Welle 3. Ordnung schwingt mit der dreifachen Frequenz der Welle 1. Ordnung und hat eine Maximalamplitude, die der Ruh-Elektronendichte des wellenfreien Plasmas bei gegen die Wellenfrequenz 1. Ordnung genügend kleiner Plasmafrequenz direkt proportional ist.

4.5 Ausstrahlung bei Harmonischen der Gyrofrequenz

(R. Croci⁺)

In "Physics of Fluids" ist eine Arbeit erschienen, in der die Lösungen $k(\omega)$ der mikroskopischen Dispersionsbeziehung für ein Maxwell-Plasma abgeleitet werden (mit E. Canobbio).

Neuere Rechnungen haben gezeigt, daß die von Landauer und anderen beobachteten Linien, die bei den Harmonischen von ω_e liegen, von außerordentlichen transversalen Wellen ausgestrahlt werden sollten.

Die in anderen Experimenten beobachteten Linien, die zwischen zwei Harmonischen liegen, können als von quasi-longitudinalen Wellen angeregte Strahlung geklärt werden.

Ein Kopplungskoeffizient für die quasi-longitudinalen und die außerordentlichen transversalen Wellen mit den Wellen, für welche $\lim_{\omega_p \rightarrow 0} N(\omega_p) = 1$ wird, wurde berechnet.

+) EURATOM

5. Mikroskopische Theorie

5.1 Adiabatische Invarianten

(G. Spies)

Die Kruskalsche Theorie der adiabatischen Invarianten wurde in einem besonders geeigneten Koordinatensystem auf die Gleichungen für die Bewegung eines geladenen Teilchens in einem beliebigen elektromagnetischen Feld angewandt, um die genauen Bedingungen für die Konstanz der longitudinalen Invarianten und der Flußinvarianten festzustellen. Ziel dieser Untersuchungen ist die Beantwortung der Frage, ob die drei adiabatischen Invarianten geladener Teilchen dazu geeignet sind, Aussagen über Dynamik und Stabilität stoßfreier Plasmen zu machen.

5.2 Schwach instabile elektrostatische Wellen

(H. Gratzl)

Durch die genauere Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der Verteilungsfunktion werden Korrekturen zu den kinetischen Gleichungen der Quasilinearen Theorie erhalten. Diese sind insbesondere vor dem Erreichen des asymptotischen Zustandes (nach der Quasilinearen Theorie) und für ein schmales Wellenspektrum wichtig. Diese Korrekturen zusammen mit den nicht-linearen, die schon als höhere Ordnungen zur linearen Rechnung auftauchen, sind noch nicht vollständig. Mit der Methode Dupree's (Phys. Fl. 9, 1973) folgen noch weitere.

5.3 Leitfähigkeit eines teilweise ionisierten Plasmas

(W. Feneberg)

Im Zusammenhang mit Experimenten in der Abteilung 3 (MHD-Generatoren) wurde eine Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit eines teilweise ionisierten Argon-Kalium Plasmas im Magnetfeld auf Grundlage der klassischen Theorie der Boltzmann-Gleichung durchgeführt. (Zeitschrift Naturforschung 21a, 9, 1966). Es zeigte sich dabei, daß eine solche Theorie die beobachtete starke Änderung der elektrischen Leitfähigkeit im Magnetfeld nicht erklären kann, so daß Instabilitäten für diesen Effekt verantwortlich gemacht werden müssen.

6. Angewandte Mathematik

6.1 Numerische Berechnung von Magnetfeldern

a) Stellaratorfelder

(O. Eder, R. Gorenflo, M.G. Pocco⁺), A. Schlüter, H. Welter)

Es wurden ALGOL-Programme entwickelt zur Berechnung von Stellarator-Vakuum-Magnetfeldern, von approximativen magnetischen Flächen und von physikalisch relevanten Integralen (z.B. über $d\ell/B$) längs der Feldlinien und Mittelwerten von solchen auf magnetischen Flächen. Die Programme benötigen als Eingabe die Leiter-Konfiguration und die in ihr

⁺) EURATOM

fließenden elektrischen Ströme sowie ein von außen angelegtes homogenes Zusatzfeld in Achsenrichtung. Durch numerische Durchrechnung vieler Einzelfälle wurde eine Übersicht gewonnen über die Qualität der Konfigurationen in Abhängigkeit von vorgebbaren Parametern.

b) Feinstruktur der magnetischen Flächen

(D. Lortz, A. Welter)

Ein Programm zur möglichst genauen Integration der Feldlinien analytisch vorgegebener toroidaler Vakuum-Magnetfelder wurde entwickelt und damit die unter 1.2 zitierten Ergebnisse gewonnen.

6.2 Numerische Analysis

a) (O. Eder)

Die für Magnetfeldberechnungen verwendeten Interpolationsformeln für 2 unabhängige Veränderliche wurden systematisch für verschiedene Anzahlen von Stützpunkten und andere vorgegebene Nebenbedingungen ausgebaut.

Es wurden einige physikalische Aufgaben numerisch bearbeitet und einzelne allgemein anwendbare Rechenprogramme entwickelt.

b) Entwicklung von Rechenmethoden und Programmen:

1) ALGOL Prozeduren BESSJ, BESSI, BESSY, BESSK

Zur Berechnung der Besselfunktionen und modifizierten Besselfunktionen erster und zweiter Art. (H.H. Berghahn)

2) ALGOL Prozedur IROUTA

ALGOL Version der Fortran Routine IROUT (G. Glas⁺).

3) ALGOL Prozedur EXTLIM

Berechnung der Summe unendlicher Reihen mittels Konvergenzbeschleunigung (G. Glas).

4) ALGOL Prozedur NULLST

Bestimmung sämtlicher Nullstellen einer reellen Funktion in einem endlichen Intervall.

5) Subroutine QUADRA

Minimalisierung eines quadratischen Ausdrucks unter linearen Ungleichungen als Nebenbedingung -"quadratic programming" (Y. Kovetz - M.G. Pacco).

6) Subroutine MERG

Sortierprogramm zum Ordnen einer 1-dimensionalen Zahlenfolge der Größe nach, mehrere Versionen (M.G. Pacco)

7) Subroutine HSLR

Ermittlung der Höenschichtlinien einer in Tabellenform vorliegenden Funktion (D. Seewald).

+) Werkstudent Sommer 1966

6.3 Ausbildung von Programmierern

(O. Eder)

Im Rahmen der Ausbildungstätigkeit von Programmierern wurde an der Technischen Hochschule in München von Anfang September bis Jahresende an 2 bis 3 Tagen der Woche ein zweistündiger Kurs über Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik abgehalten. An dem 2 1/2 - jährigen Lehrgang nehmen auch 3 Programmierer unserer Abteilung teil.

6.4 Rechenanlage

a) Rechenzeitverbrauch

Rechenzeitverbrauch im Jahre 1966		
	Std.Min.	Std.Min.
Institut für Plasmaphysik	1 897.28	
Experimentelle Plasmaphysik 1		653.59
Experimentelle Plasmaphysik 2		39.43
Experimentelle Plasmaphysik 3		82.52
Theorie		804.48
Technik		16.08
Verwaltung		112.24
Systemarbeit		116.02
Ausfall		71.32
Andere Institute	4 562.05	
Deutsches Rechenzentrum		201.14
Inst. f. Angew. Geophysik München		0.15
Inst. f. Wirtschaftsforschung		101.14
Inst. f. Wirtschaftslehre Gießen		4.05
Inst. f. Plasmaphysik Jülich		19.56
Inst. f. Regelungstechnik		54.46
Inst. f. Arbeitsphysiologie		23.12
Inst. f. Eiweiß- und Lederforschung		562.01
Fritz-Haber-Institut Berlin		7.49
MPI f. Astrophysik		1 328.59
MPI f. Extraterrestr. Forschung		132.56
MPI f. Kernphysik Heidelberg		4.25
MPI f. Physik		1 170.43
MPI f. Psychologie		11.16
MPI f. Verhaltensforschung		29.44
Techn. Hochschule München		223.22
Universität München		637.06
Universität Tübingen		32.57
Universität Wien		9.44
Bayer. Akademie der Wissenschaften		6.21
insgesamt	6 459.33	

b) Mitte Juli wurde eine IBM/360 Modell 30 installiert. Aufgabe der Maschine war es vor allem, die vorhandene IBM 1401 bei der Bewältigung der Eingabe/Ausgabe-Aufgaben der IBM 7090 zu entlasten. Es wurde ein spezielles Programm entwickelt (K.H. Gohl, F. Hertweck), so daß ab Mitte August der gesamte 7090-output über die 360 abgewickelt werden konnte. Die Entwicklung einer Kopplungselektronik, die eine direkte Datenverbindung zwischen IBM 360/30 und IBM 7090 herstellen soll, wurde begonnen (W. Melkus, F. Hertweck).

Die Testarbeiten mit IBSYS wurden bis Mitte des Jahres abgeschlossen (A. Jelic). Danach wurde IBSYS, Version 13, als Standard-Betriebssystem verwendet.

ABTEILUNG TECHNIK (DIPL.-ING. K.H. SCHMITTER)

1. Projektierung

Die Arbeit der Projektierungsgruppe im Jahre 1966 war im wesentlichen bestimmt durch den Aufbau von drei größeren schnellen Stoßstromanlagen. In Zusammenarbeit mit den beteiligten Fachgruppen und den jeweiligen Benutzern wurden die Anlagen technisch geklärt und ihr Aufbau eingeleitet und überwacht.

Projekte

Die im Februar 1965 in Betrieb genommene 1,5/2,6 MJ-Stoßstromanlage "ISAR I" wurde vom Benutzer bis Juli 1966 mit 30 kV betrieben. Nach wenigen 40 kV-Entladungen trat dann eine Beschädigung des Kollektors auf, die den Abbau des Hauptkollektorteils erforderlich machte. Gleichzeitig mit dieser Reparatur wurde mit dem Einbau der Crowbarschaltung (siehe Bericht Hochspannungstechnik) begonnen sowie die Kollektorverlängerung vorbereitet. Letztere war Ende 1966 fertig montiert (siehe Bericht Konstruktion).

Abb. 18 zeigt den Bauzustand Mitte Dezember 1966.

Das System kann bis zu 700 t vorgespannt werden, wodurch sich die auftretenden Sprungbewegungen bei 40 kV-Betrieb auf ca. 0,2 mm verringern. Die "Sprungmassen" bestehen aus glasfaserarmiertem Kunstharz-Schwerbeton. Dabei ist die Armierung in die Glasfaser-Polyester-Umhüllung eingebunden. Die Kollektorverlängerung ist bei 1,5 m Breite 90 cm lang und beseitigt den Einfluß der Einschnürung der elektrischen Strömung am Kollektoranschluß. Die Radialsymmetrie des magnetischen Feldes im Bereich der radial ungeteilten Spulen ist durch Einschnürung der Anschlußplattendicke und Entfernen von Metallmassen aus dem Rückschlußbereich verbessert. Mit der Wiederinbetriebnahme der Anlage ist im Februar 1967 zu rechnen.

Der Fertigstellungstermin für die im Jahresbericht 1965 erstmals mit Daten genannten Anlagen ISAR II (500 kJ-Batterie) und Turbulenzbatterie hat sich infolge längerer Entwicklungszeiten verschoben [IPP 4/26].

Die Turbulenzbatterie ist im wesentlichen nunmehr fertiggestellt (ohne Vormagnetisierung), ihre Inbetriebnahme beginnt im Februar 1967. Die Daten der Anlage sind:

Hauptbatterie:	Max. Ladespannung	2 x 40	kV
	Batteriekapazität	2 x 6	µF
	Max. Energie	2 x 4,8	kJ
	Max. Entladestrom	567	kA
	Betriebsfrequenz	373	kHz
	Max. Induktion	11,8	kG
	Max. Verbraucherspannung	2 x 26,9	kV
	Max. Stromanstieg	1,33	$\frac{MA}{\mu S}$
	Max. Induktionsanstieg	27,6	$\frac{kG}{\mu S}$
	Spulenabmessungen: Länge	60	cm
	Durchmesser	15,8	cm
	Magnetfeldbatterie:	Ladespannung	2 x 12
Getrennte mehrwindige Spule			
Länge		104	cm
Durchmesser		40	cm
Max. Induktion		6,6	kG
bei Spiegelverhältnis 1:2	6,5/13	kG	

Abb. 19 zeigt den Bauzustand Anfang Januar 1967. Es fehlen noch der Anschluß der oberen Batteriehälfte sowie die mehrwindige Vormagnetisierungsspule.

Die Bauzeit von ISAR II wird sich bis Frühsommer 1967 hinausschieben. Ende 1966 waren fertiggestellt: Langsame Steuerung und Ladegeräte, Kondensatoren, Impulskabel und Bauteile für Kondensatoreinheiten teilweise, Kondensatoren, praktisch alle Kollektorbauteile. Montiert waren Batterie- und Kollektorgerüst.

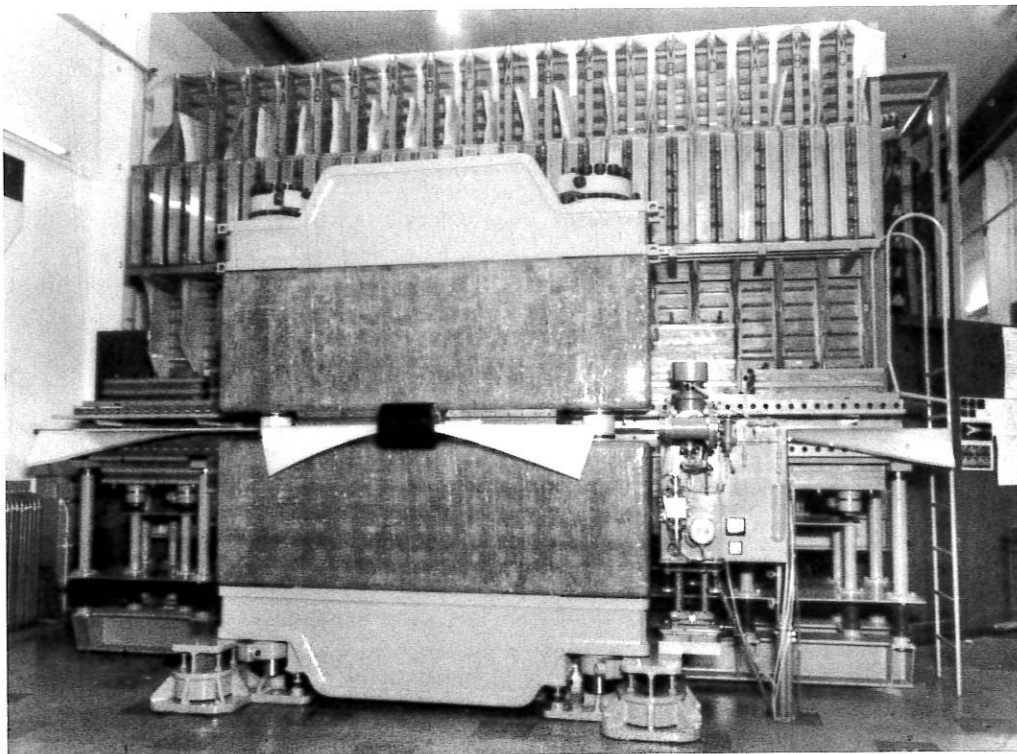


Abb. 18: Stoßstromanlage "ISAR I" mit Kollektorverlängerung. Bauzustand Mitte Dezember 1966.

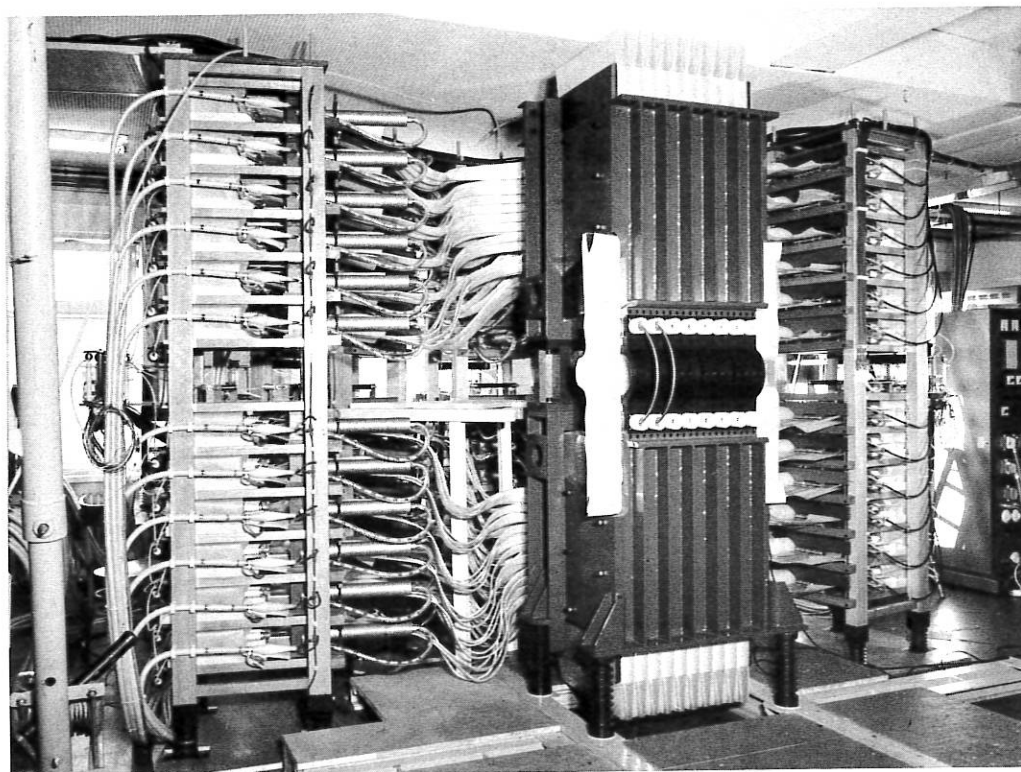


Abb. 19: Stoßstromanlage zum Turbulenzexperiment. Bauzustand Anfang Januar 1967

Die Anlagedaten sind:

Hauptbatterie:	Max. Ladespannung	2 x 40	kV	
	Batteriekapazität	2 x 312	μ F	
	Max. Energie	2 x 250	kJ	
	Max. Entladestrom	7,23	MA	
	Betriebsfrequenz	92,6	kHz	
	Abfallzeitkonstante bei Crowbarbetrieb	90	μ s	
	Max. Induktion	90,2	kG	
	Max. Verbraucherspannung	2 x 23,2	kV	
	Max. Stromanstieg	4,20	$\frac{MA}{\mu s}$	
	Max. Induktionsanstieg	52,5	$\frac{kG}{\mu s}$	
	Spulenabmessungen:	Länge	100	cm
		Durchmesser	10,64	cm
	Magnetfeldbatterie:	Ladespannung	2 x 12	kV
Max. Induktion		2,1	kG	

Sonstiges

Die technische Klärung im Rahmen von Projekten, insbesondere die von der Projektierungsgruppe selbst betriebene Entwicklung der Kollektoren (Verbraucheranschlüsse) für Stoßstromanlagen erforderten weitgehenden Einsatz und Ausbau der im Laufe der letzten Jahre aufgebauten Analogeinrichtungen (Niederspannungsmodellsystem, automatischer elektrolytischer Trog, Meßtechnik maßstäblich verkleinerter elektrischer Strömungsmodelle) [IPP 4/29] und [4/30]. Spezielle technische Details im Zusammenhang mit der oben genannten Entwicklung wurden in Ausschnitt-Dauerversuchen geklärt, z.B. Isolationsanordnungen und steckbare Impulsstrom-Verbindungen. Bei den letzteren wurden 12 000 Entladungen mit über 30 kA je Steckverbindung ohne Beschädigung durchgeführt. Die Versuche laufen weiter [IPP 4/29] und [4/30].

Abb. 20 zeigt den im Trog gemessenen magnetischen Potentialverlauf für eine neue ISAR I-Endspule.

Im allgemeinen Maschinenraum der Abteilung Technik wurde eine Mittelfrequenz-Kompensationsanlage installiert.

Die von der Projektierungsgruppe betreute Abteilungsbibliothek umfaßte am 22.12.1966 860 Bände. In Zusammenarbeit mit der Gruppe Dokumentation wurde die Literaturdokumentation für den Bereich Technik vorbereitet und eingeleitet.

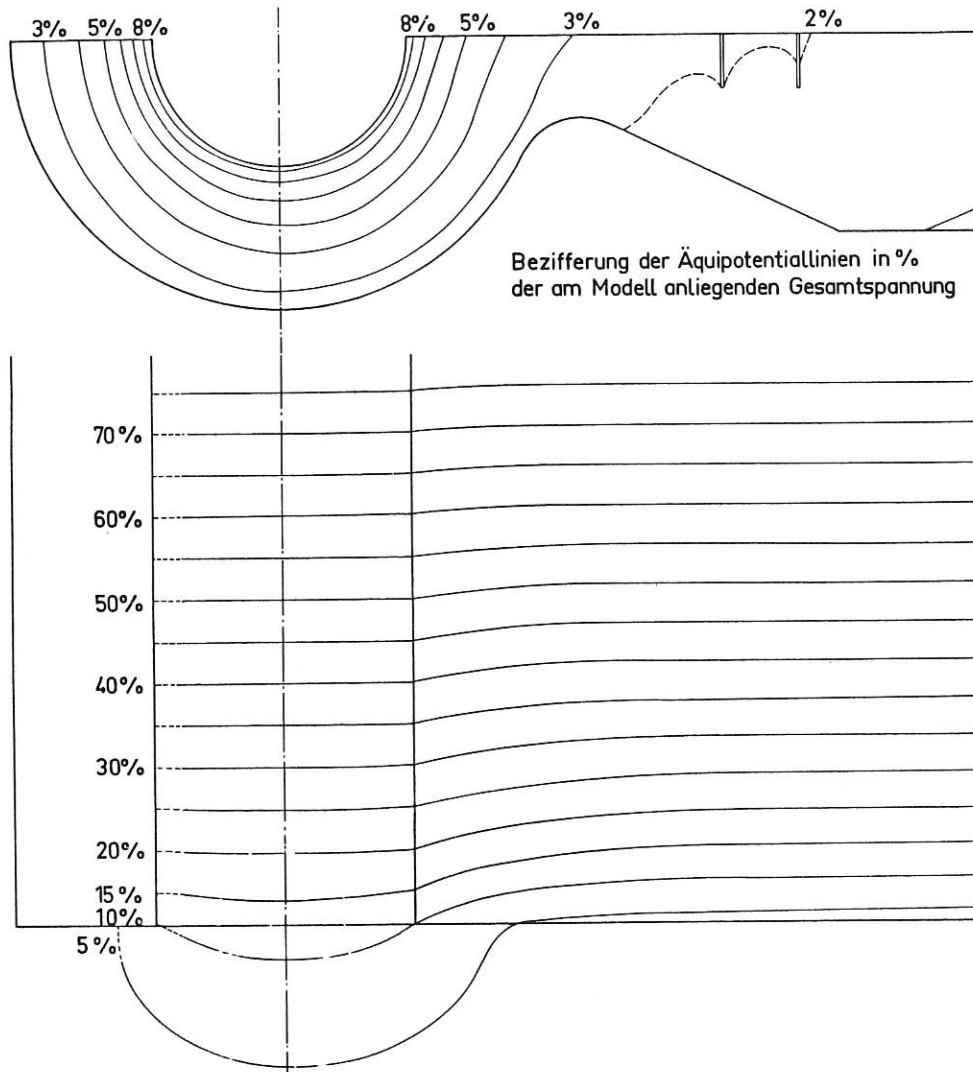


Abb. 20: Neue Endspule "ISAR I". Verlauf der magnetischen Potentiallinien in der Schlitz-
ebene sowie auf der Stirnfläche.

2. Konstruktion

Die Konstruktionsgruppe A war im Jahre 1966 vorwiegend mit der Ausarbeitung konstruktiver Unterlagen für neue Kondensatorbatterien der Abteilung 1 und der Überwachung der zugehörigen Fertigungs- und Montagearbeiten befaßt. Dazu gehörten die Kollektoranlagen für "ISAR II" und für die Turbulenzbatterie, die unter der Federführung der Gruppe Projektierung erstellt wurden und die 40 kV Start-Crowbarfunkenstrecke, die für die Anlage "ISAR II" bestimmt ist und gemeinsam mit der Gruppe Hochspannungstechnik konstruiert wurde. Die Fertigung von 265 solcher Funkenstrecken wurde eingeleitet. Außer der Konstruktion dieser und anderer hochspannungstechnischer Geräte sind die Entwicklung einer verschiebbaren optischen Bank (Abb. 21) und der Anlage zur galvanischen Verkupferung supraleitender Drähte noch erwähnenswert (Abb. 22).

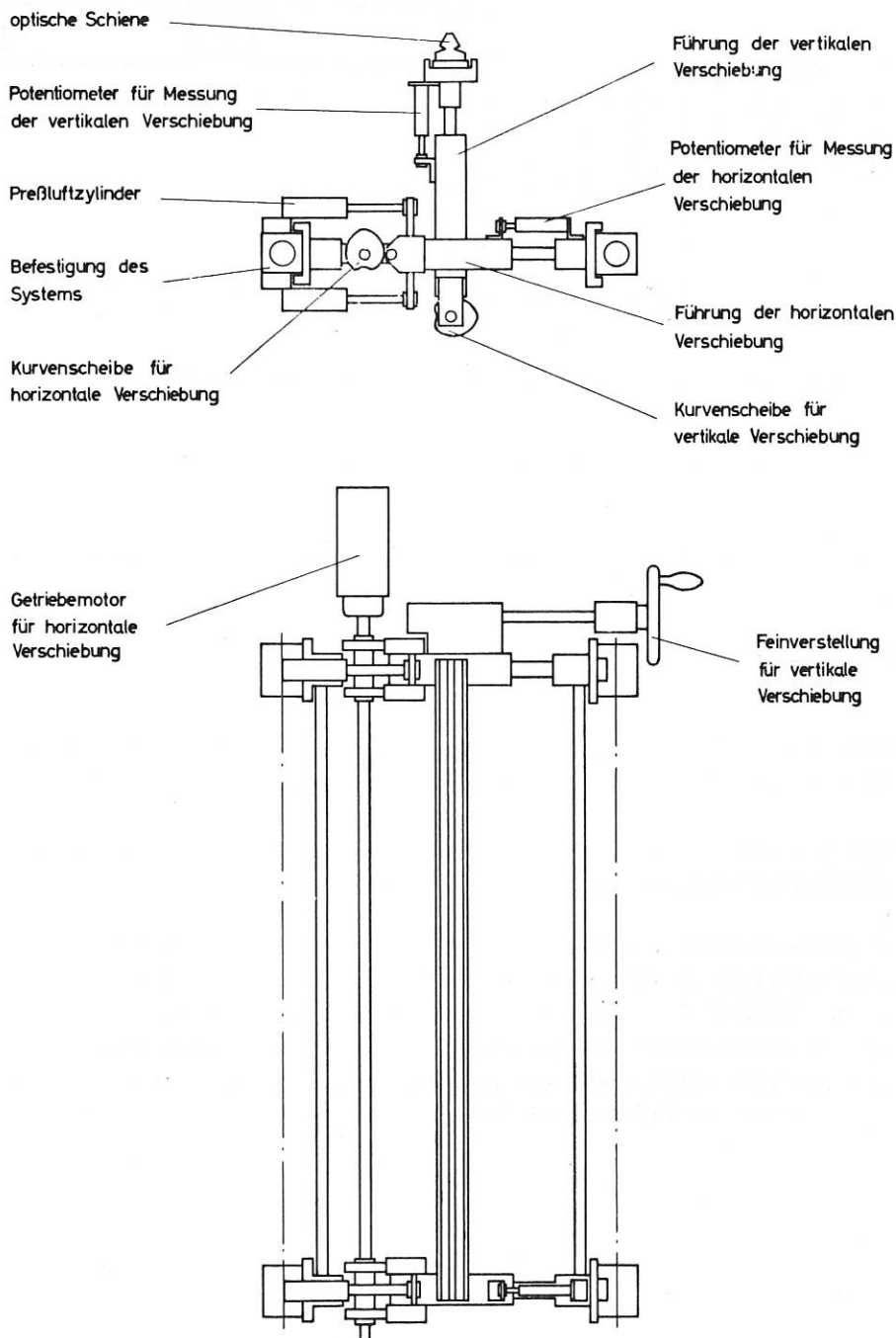


Abb. 21

Verschiebbare optische Bank für MHD - Generator

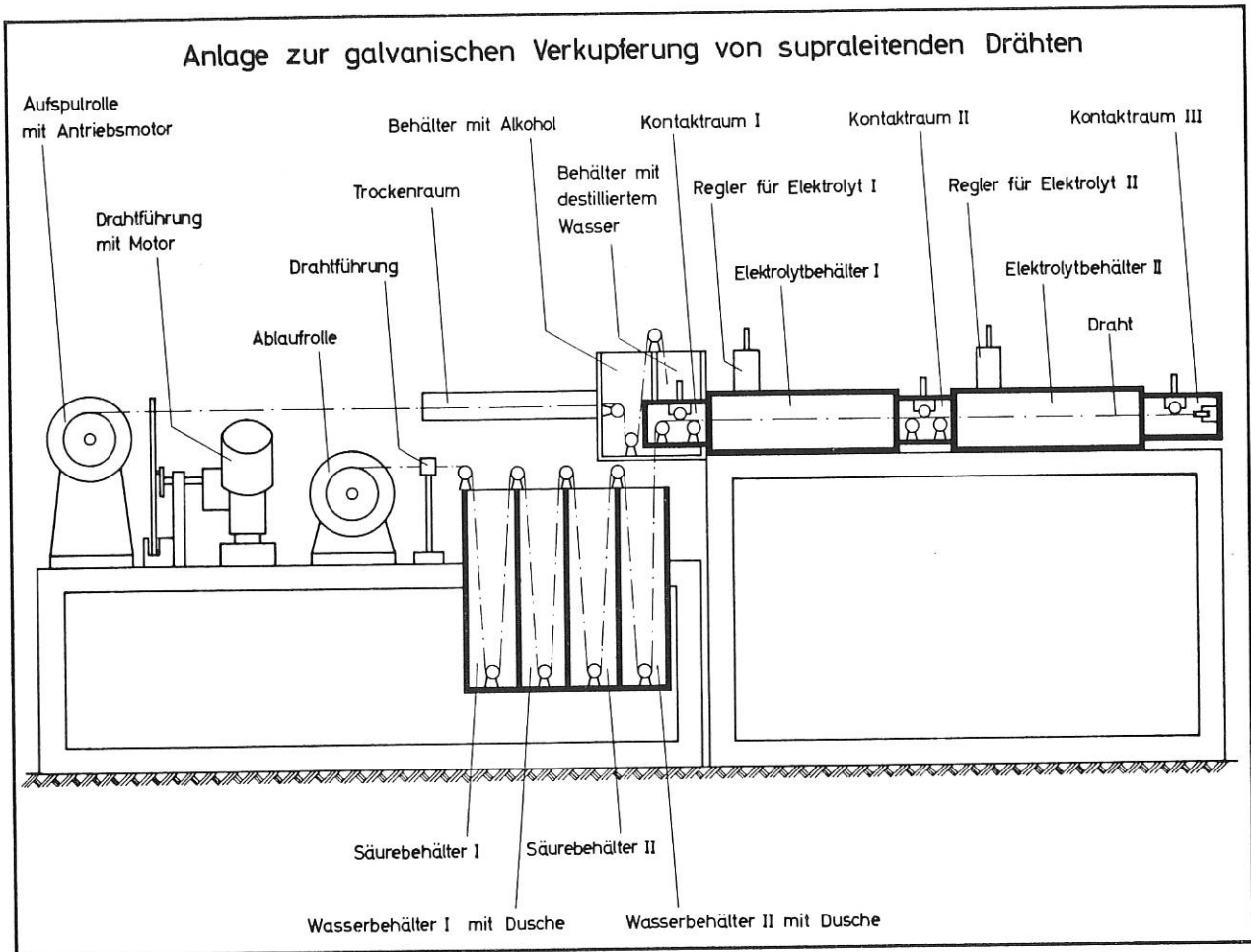


Abb. 22

Die Gruppe hatte daneben wesentlichen Anteil an der Reparatur und dem Umbau der Anlage "ISAR I" (Crowbar, Kollektorverlängerung), der im Dezember abgeschlossen wurde. (Abb. 23)

Die Konstruktionsgruppe B arbeitete auch 1966 vorwiegend für die Abteilung 2 und außerdem noch für das MPI für Extraterrestrische Physik.

Konstruktionsarbeiten größeren Umfangs waren der 10,7 m - UV - Vakuum - Spektrograph (Abb. 24) für die Extraterrestrische Physik, der Torus W 2 mit helischen Windungen, die Ionen-Cyklotron-Apparatur "SELENE I" (Abb. 25) und verschiedene Laserköpfe, Kryostaten und Hilfseinrichtungen für Arbeiten auf dem Gebiete der Supraleitung. Neben diesen neuen Arbeiten sind noch umfangreichere Änderungen verschiedener Apparaturen, wie des Beschleunigers der Hochvakuumgruppe und des Experiments "ELSA" zu nennen.

Umbau der Anlage „Isar I“

Betr.: Kollektorverlängerung

2 Verspannungsbolzen
mit einer Vorspannkraft
von ca 720 to

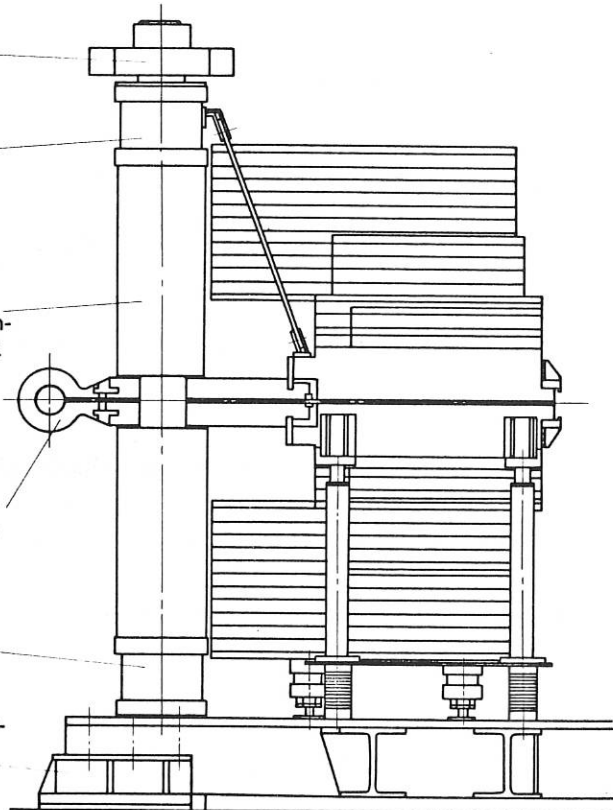
Traverse oben zur
Verspannung

Kunstharzbeton-Gewichte:
Bestehend aus Barytsand
mit Quarzmehl u. Glasge-
webeschnitzel m. Lekutherm-
Epoxydharz als Bindemittel
u. einer Armierung.
Gewicht a ca 1,85 to

Stahl-Spulen mit Cu-Leit-
belägen (6 Spulen mit einer
Gesamtlänge von 1500 mm)

Traverse unten zur
Verspannung

Grundrahmen für Kollektor-
verlängerung



Höhe der Verlängerung \approx 3150 mm

Abb. 23

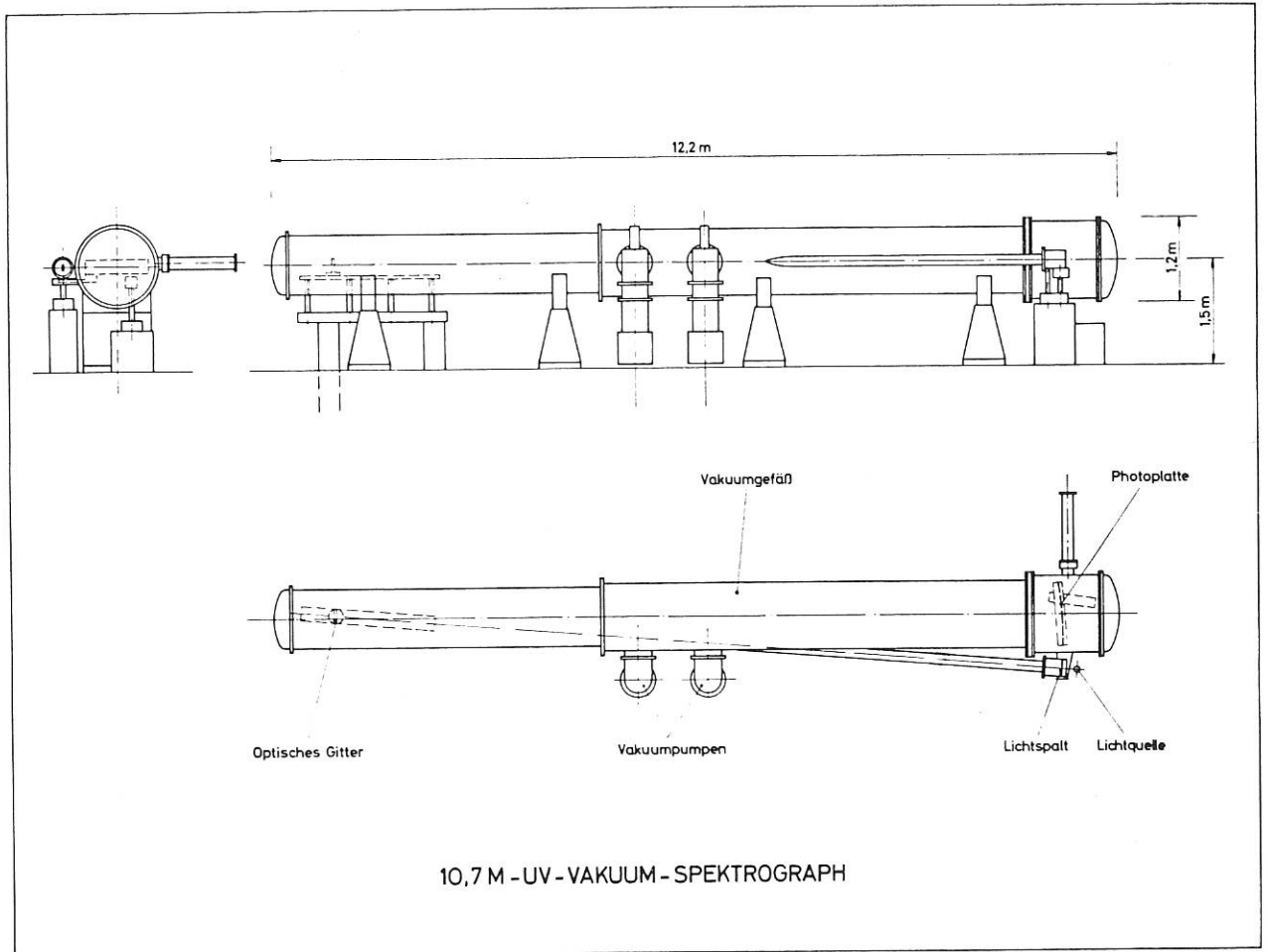


Abb. 24

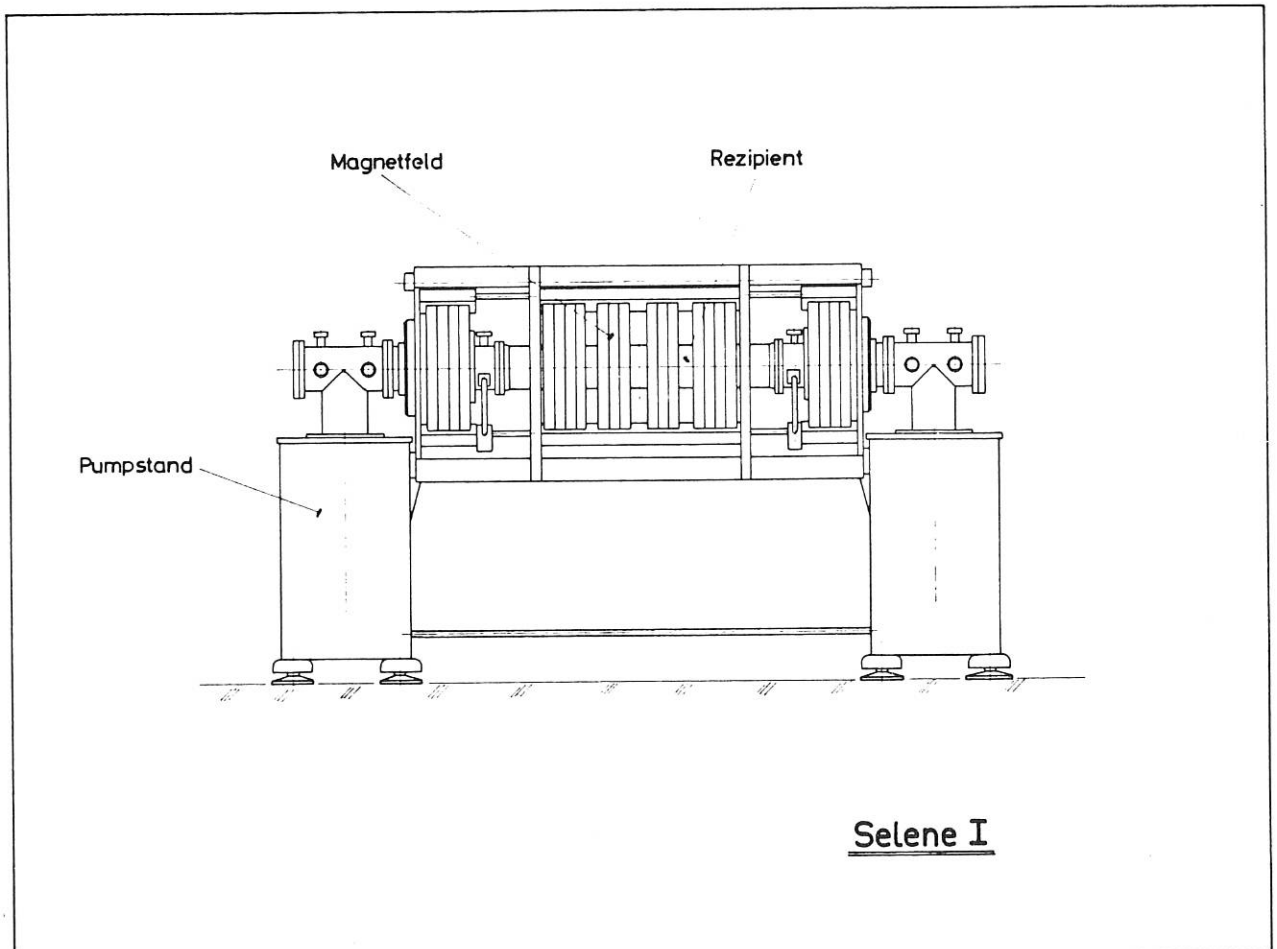


Abb. 25

3. Hochspannungstechnik

3.1 Arbeiten für ISAR I [IPP 4/32]

Die bereits im Jahresbericht 1965 beschriebenen Crowbar-Funkenstrecken wurden zur Serienreife gebracht, gefertigt und in ISAR I eingebaut (252 Kreise). Gleichzeitig wurden 2 Musterfunkenstrecken der endgültigen Ausführung in einem Dauerversuch über 13 000 Entladungen betrieben. Nach anfänglichen Schwierigkeiten durch Vorzündungen im Triggerkreis konnten die letzten 3000 Entladungen ohne Fehlzündungen durchgeführt werden. Die Funkenstrecken mit Triggerkreis arbeiten nach dem Dauerversuch noch einwandfrei (Abb. 26).

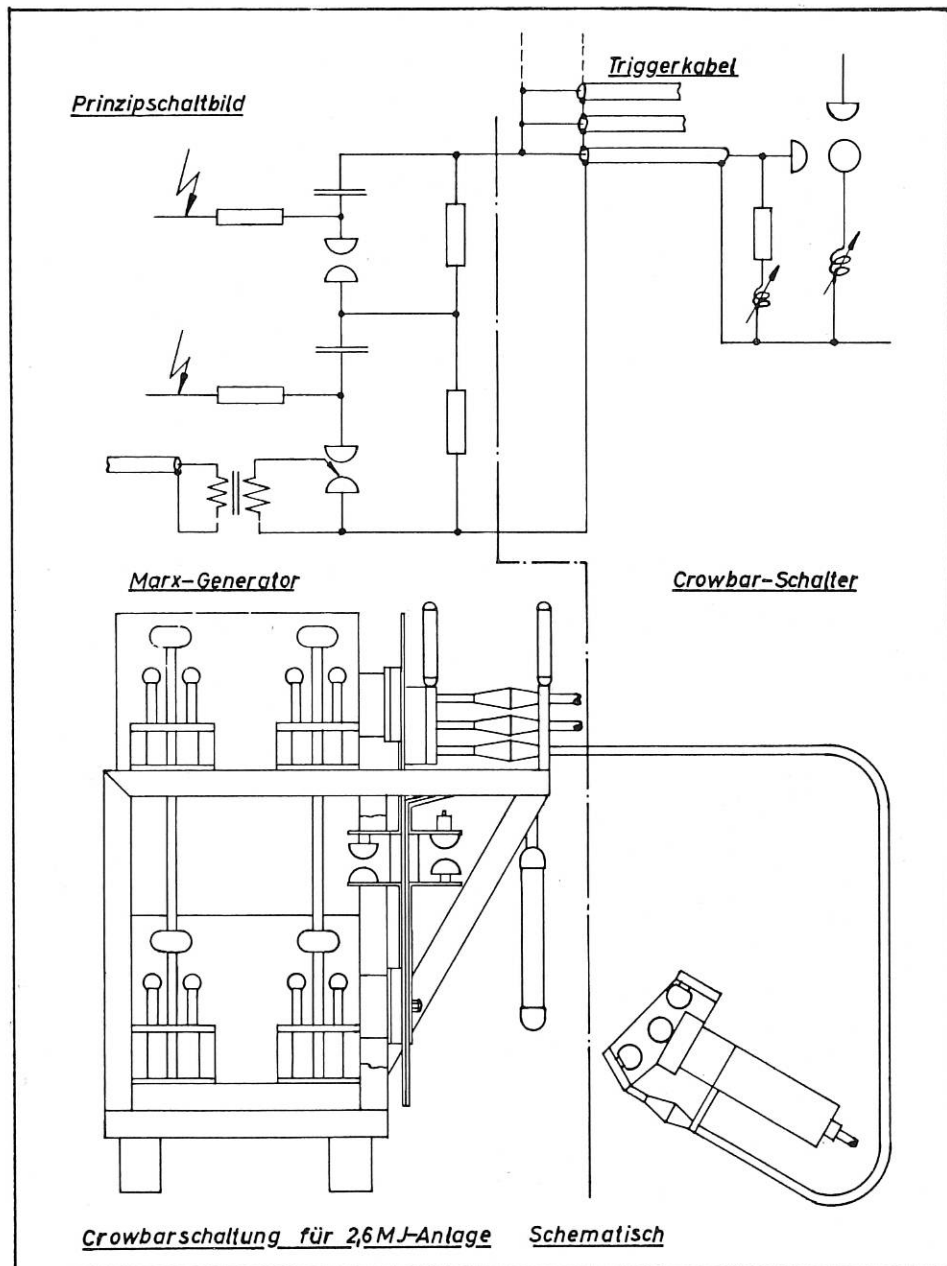


Abb. 26

Zur Triggerung der 252 parallelen Crowbar-Funkenstrecken in der 2,6 MJ-Anlage wurden 18 zweistufige Marx-Generatoren in 6 Gestellen installiert. Dauerversuche mit einem Generator verliefen bei einer Stufenspannung von 48 kV über 5000 Entladungen und von 40 kV über 13 000 Entladungen ohne Störung. Die Betriebsspannung wird bei 35 ... 40 kV Stufenspannung liegen (siehe Abb. 27).

Außerdem wurden 252 Triggerkabel mit Endenabschlüssen für 135 kV versehen und in der Batterie verlegt.

Die Inbetriebnahme der 2,6 MJ-Anlage mit Crowbar-Schaltung geschieht im Februar 1967.

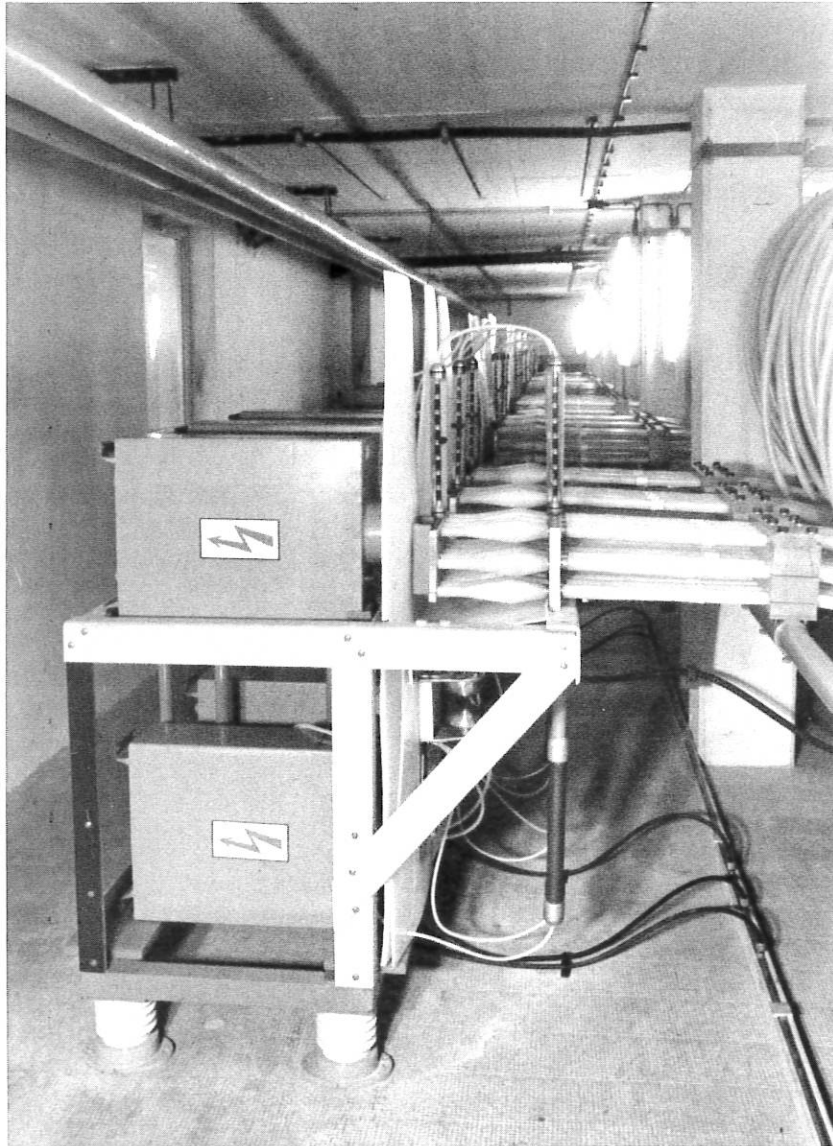


Abb. 27: Marx-Generatoren

3.2 500 kJ-Anlage

Im Rahmen der 500 kJ-Batterie wurden die Entwicklungs- und Versuchsarbeiten soweit abgeschlossen, daß praktisch alle Bauelemente für die Fertigung freigegeben werden konnten. Als Schalter wird eine kombinierte Start- und Crowbar-Funkenstrecke eingesetzt, deren Isolation in quarzmehlgefülltem Epoxyharz ausgeführt ist (Abb. 28). Ein Versuchsmuster wurde als Startschalter mit $50 \cdot 10^3$ Schaltspielen und als kombinierter Start- und Crowbar-

Schalter mit $50 \cdot 10^3$ Schaltspielen ohne Beanstandungen geprüft. Eine weitere Erprobung von 4 parallelen Funkenstrecken der ersten Fertigungsserie mit 9000 Entladungen verlief ohne Ausfall. Hierbei war der max. Scheitelstrom 65 kA je Funkenstrecke. Die Induktivität des Startschalters beträgt 37 nH, die des Crowbarschalters ca. 180 nH im gesättigten Zustand der Ferritkerne. Der Arbeitsbereich der Start-Funkenstrecke liegt zwischen 20 und 40 kV (stat. Durchbruchspannung 56 kV) bei einem Jitter $\leq \pm 10$ ns. Als Crowbar-Schalter wird eine ferritkoppelte Funkenstrecke eingesetzt, deren Prinzip bereits für die Crowbarschaltung der 2,6 MJ-Anlage angewendet wurde. Die Triggeranlage besteht wiederum aus 2-stufigen Marxgeneratoren. Die für die Triggerkabel entwickelten Gießharzendverschlüsse erreichten bei den ersten beiden geprüften Mustern eine Lebensdauer von 520 000 Entladungen mit 135 kV.

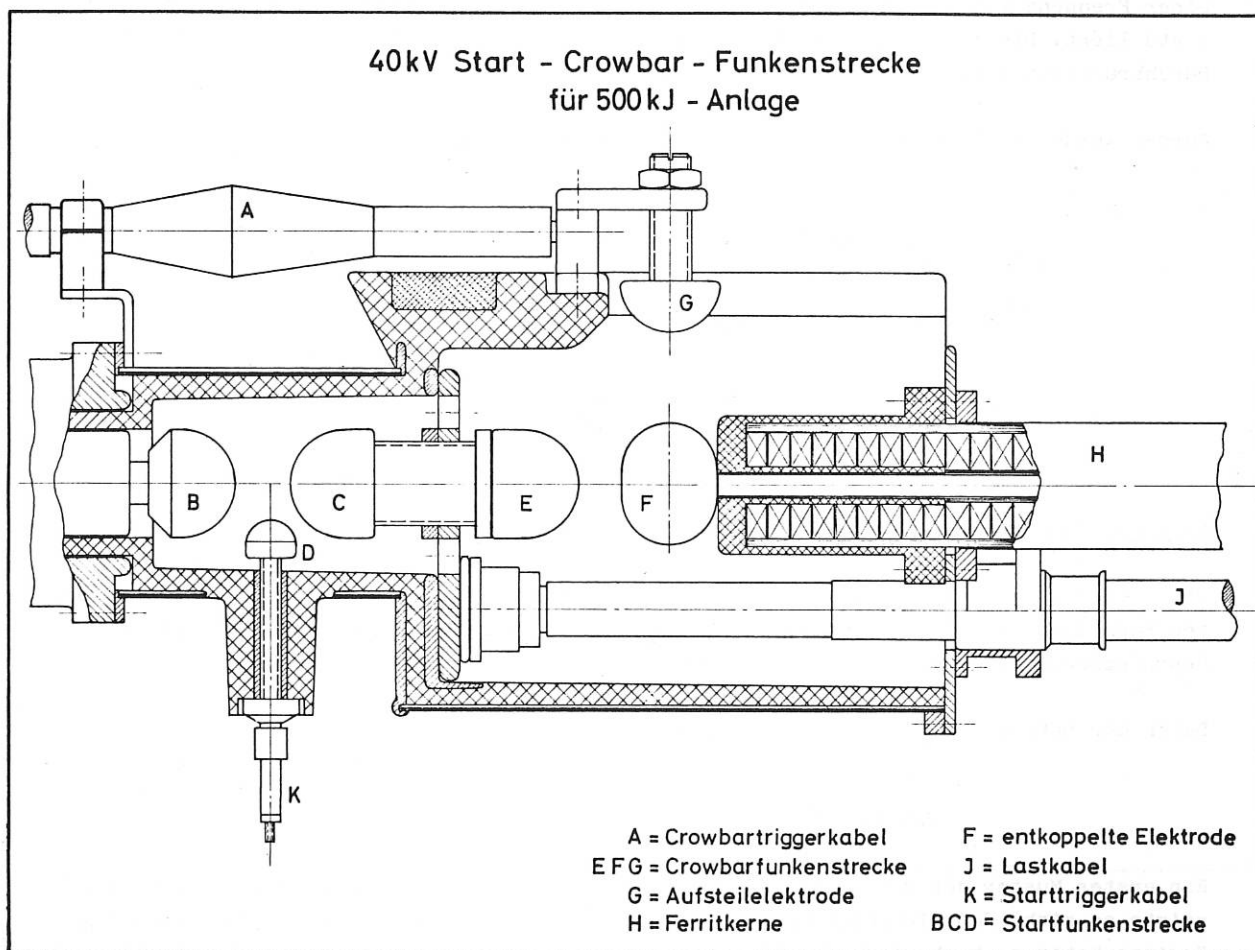


Abb. 28

Alle übrigen Bauelemente wie Ladewiderstände, Kurzschließer, Steuerwiderstände und Steuerkondensatoren wurden in Dauerversuchen untersucht. Außerdem wurde eine Mutterfunkenstrecke zum Ansteuern der Marx-Generatoren und Startschalter entwickelt, die ähnlich der Hauptfunkenstrecke aufgebaut ist und ebenfalls in Gießharztechnik ausgeführt wird. Der Jitter der Funkenstrecke im Arbeitsbereich von 25 - 35 kV (stat. Durchbruchspannung 42 kV) ist kleiner als ± 3 ns, der Anstieg des Ausgangspulses ist bei 24 angeschlossenen Kabeln $\geq 2,5$ kV/ns am offenen Kabelende mit einer Länge ≥ 10 m.

3.3 Batterie zur Turbulenzaufheizung

Für die Batterie zur Turbulenzaufheizung [IPP 4/28] wurde die bereits im Jahresbericht 1965 beschriebene kombinierte Start- und Crowbar-Funkenstrecke zur Serienreife weiterentwickelt und in 80 Exemplaren gefertigt (in Zusammenarbeit mit der Gruppe Technologie). Der Schaltbereich der Startfunkenstrecke kann durch Druckänderung zwischen 0...4 atü von 5...46 kV variiert werden, bei einem Jitter von $\leq \pm 5$ ns. Die Induktivität des Startschalters beträgt ≤ 40 nH, die des Crowbarschalters im gesättigten Zustand der Ferritkerne ca. 180 nH. Der Startschalter änderte seine Charakteristik bei einem Dauerversuch mit 40 kV-25 kA/410kHz bis zu 8000 Entladungen noch nicht. Die Batterie wurde in Zusammenarbeit mit dem Benutzer und der Gruppe Projektierung montiert und ist praktisch fertig zur Erprobung.

Für die gleiche Anlage wurde die Vorionisationsbatterie aus zwei Kondensatoren für 120 kV mit einer Gesamtkapazität von 1,68 μ F entwickelt und gebaut. Die Kondensatoren werden mit einer Frequenz von 525 kHz über eine koaxiale Funkenstrecke entladen, die unter \bar{M} 1 bei 1 atü liegt. Die Zündverzögerung beträgt 50 nsec, der Jitter 10 ns bei 80 % der stat. Durchbruchspannung.

Ferner wurde die Vormagnetisierungs-batterie im Muster erprobt.

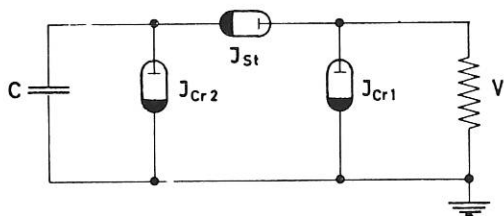


Abb. 29: Schaltschema der Vormagnetisierungs-batterie

Im Gegensatz zu der sonst üblichen Anordnung wird hier eine Schaltung mit zwei getrennten Kurzschlußpfaden angewendet, um eine möglichst große Rückenzeitkonstante bei guter Reproduzierbarkeit des Entladungsverlaufs zu erhalten.

Daten der Batterie: I_{\max} : 37 kA/1 kV Ladespannung
 Stromanstiegszeit 12,5 μ s
 Rückenzeitkonstante $\tau = 80$ μ s

Ein erstes Muster der Beschaltungskondensatoren wurde fertiggestellt und erprobt. Dabei zeigte es sich, daß die Feldstärke im Tränkmittel am Belagrand zwischen den einzelnen Serienpaketen so hoch wird, daß Glimmentladungen auftreten und Wasserstoff entsteht. Ein verbessertes Muster mit reduzierter Feldstärke ist im Bau, wobei gleichzeitig ein Wasserstoff-Absorber im Tränkmittel erprobt werden soll (in Zusammenarbeit mit der Gruppe Chemie). Glimmentladungen traten nicht auf.

3.4 14 kV-Triggergerät

Als Ersatz für das im 14 kV-Triggergerät eingesetzte Thyatron PL 522, das wegen des geringen Abstandes zwischen Arbeits- und Haltespannung häufig zu Störungen durch zurücklaufende Wellen führt, wurde eine Vier-Elektrodenfunkenstrecke kleiner Abmessungen entwickelt. Funken-

strecke, Kondensatoren und Ausgangswiderstände sind in einem Rohr koaxial angeordnet und ergeben dadurch einen induktivitätsarmen Pulsgenerator folgender Daten:

Anstiegszeit	25 ns	Ausgangsspannung	± 25 kV
Jitter	$< \pm 2$ ns	(am Ende eines 10 m/50 Kabels)	
Delay	60 ns	Rückspannungsfestigkeit	≥ 8 kV

Der kleine Jitter wurde durch das Prinzip der Feldverzerrung (Elektrode C) mit zusätzlicher Pulskoronabestrahlung (Elektrode D) erreicht. Ein Dauerversuch zeigte noch keine Änderung der Funkenstreckeneigenschaften bis 50 000 Entladungen. (Abb. 30)

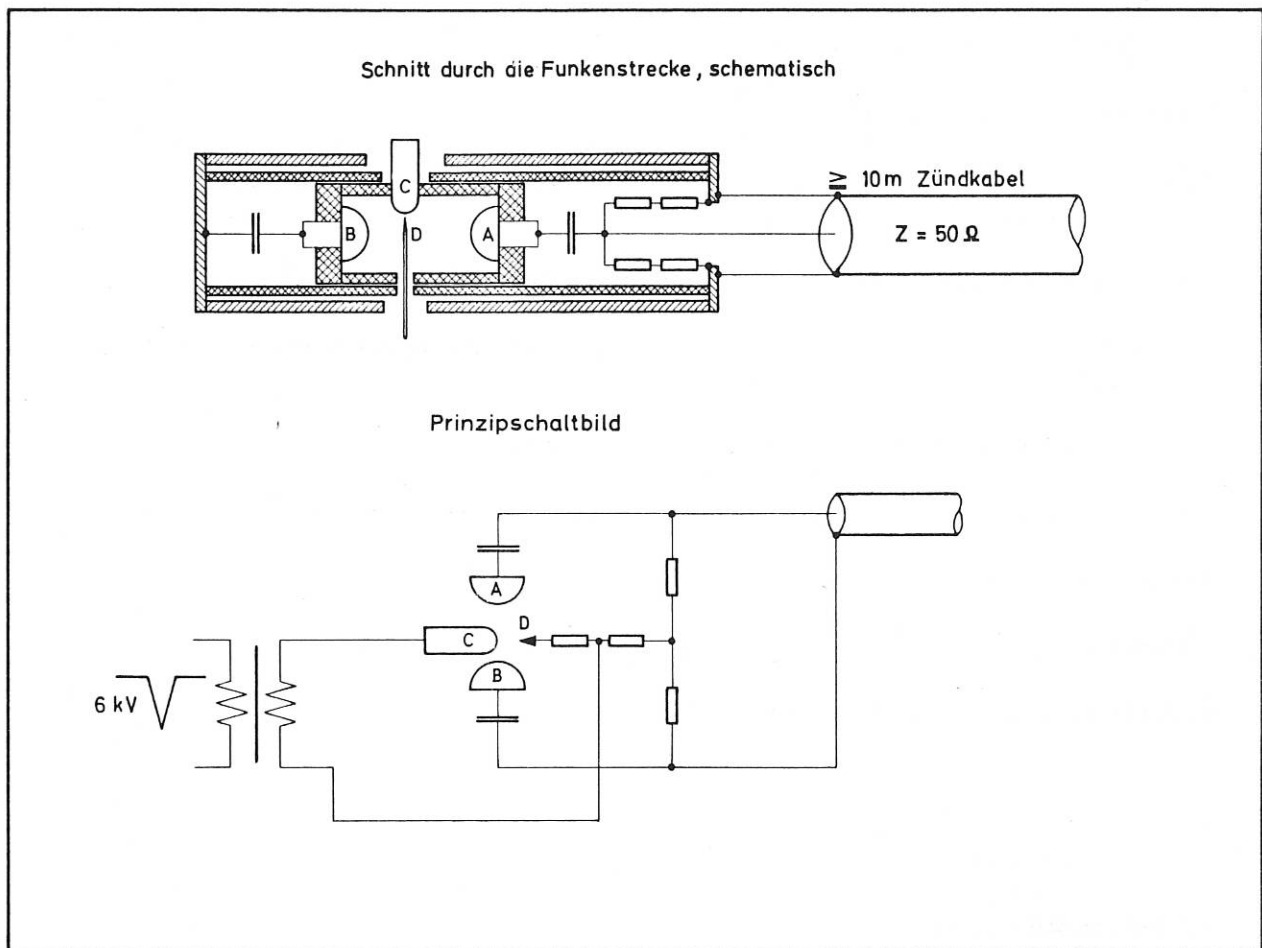


Abb. 30:

3.5 Crowbar-Anlage für 80 kJ-Batterie Abt. 1

Für eine bereits vorhandene 80 kJ-Batterie wurde ein Crowbar-Schalter entwickelt, der besonders induktivitätsarm ist. [IPP 4/32]. Dies wurde wegen der ungünstigen Induktivitätsverteilung in der Batterie notwendig, bei einer geforderten Welligkeit von weniger als 20 %. Der Schalter ist ferritkoppelt und wird durch Feldverzerrung gezündet. Seine Induktivität beträgt im gesättigten Zustand der Ferritkerne ca. 60 nH.

Die Funkenstrecke, deren stat. Durchbruchspannung auf 5⁴ kV eingestellt wird (Batterieladespannung 40 kV), schaltet im Nennbetrieb Scheitelströme bis zu 200 kA. Daher muß die Mittelelektrode nach 2500 Entladungen ausgewechselt werden. Es wird zur Zeit untersucht, wie die Lebensdauer der Mittelelektrode verlängert werden kann.

3.6 Weitere Arbeiten

Jittermessungen an Startschaltern für 2,6 MJ-Anlage mit unterschiedlichen Mittelelektroden.

Mutterfunkenstrecke für Marx-Generatoren der Crowbar-Einrichtung der 2,6 MJ-Anlage als verbessertes Triggertron.

C und γ -Messungen an ISAR I.

Messungen an Ferritkernen [IPP 4/32].

Untersuchung einer Baueinheit aus Kondensator + Funkenstrecke + Triggerkreis der Firma Tobe Deutschmann.

Messungen über die Spannungsverteilung von Stoßwellen in Kondensatoren.

Untersuchung der Löscheigenschaften von Ignitrons bei niedrigen Frequenzen (in Verbindung mit Stoßwellenrohrbatterie) Abt. 3.

Hochspannungsmesswiderstände für 40 kV und 150 kV Abt. 3.

Aufbau und Erweiterung der Eieruhrbatterie in Zusammenarbeit mit dem Benutzer, Abt. 3.

Versuche zur Entwicklung eines dielektrischen Schalters.

Folienuntersuchungen zum Bau eines Kondensators hoher Energiedichte.

Laufzeitmessungen an Koaxialkabeln und Bandleitern.

4. Elektronik

4.1 Netzgeräte

4.1.1 Hochstabilisiertes Hochspannungs-Netzgerät

Für den Bildwandler wurde ein stabilisiertes Versorgungsgerät mit einer einstellbaren Ausgangsspannung von 16...20 kV entwickelt: Ausgangsleistung 20 W, Stabilität 1 % bei üblichen Bedingungen. Das Gerät ist auch zur Speisung anderer Geräte geeignet.

4.1.2 Stromstabilisator

Für die indirekte Heizung einer Kathode durch Ionenbeschuß wurde ein Gleichstromversorgungsgesät gebaut, das einen von 10...100 mA einstellbaren konstanten Strom im Spannungsbereich 500...1500 V abgeben kann. Eine elektronische Sicherung schaltet im Kurzschlußfall (Ausgangsspannung < 500 V) in 10 ms ab.

4.1.3 Stromkonstanthalter 0...6 A

Ein transistorisierter Stromkonstanthalter liefert einen zwischen 0 und 6 A einstellbaren Strom bis zu einer max. Spannung von 60 V und 0...3 A bis max. 12 V. Wahlweise kann der Strom durch eine externe Spannung von ca. 1 V gesteuert werden.

4.1.4 Stabilisierung von Gleichstrommaschinen

Für 2 Gleichstrommaschinen (12 V/150 A und 120 V/1000 A) wurden transistorbestückte Stabilisierungszusätze gebaut, die den Ausgangsstrom besser als 1 % konstant halten. Die elektronische Regelung wirkt auf die Erregerseite bzw. auf die Erregerseite der Hilfsmaschine. Einstellbereich: ca. 10...100 % des Nennstroms.

4.2 Meßgeräte - Meßverstärker

4.2.1 Elektrolytischer Trog

Bei der vollautomatischen Steuerung des elektrolytischen Trogs müssen die Koordinaten des Anfangspunktes der Abtastung einer Äquipotentiallinie gespeichert, sowie der Rand des zu untersuchenden Raumes elektrisch eingegeben werden. Ein neu entwickelter Einschub löst diese Aufgaben.

4.2.2 Analog-Multiplizierschaltung

Das Gerät arbeitet nach der Viertel-Quadratschaltung mit Feldeffekt-Transistoren. Es wurde entwickelt für die Korrelationsanalyse bis 10 MHz, kann aber auch als Mischstufe mit weitgehender Unterdrückung von Träger, Modulationsfrequenz und höheren Mischprodukten verwendet werden. Im Ausgang erscheinen dann im wesentlichen nur Summe und Differenz der Eingangsfrequenzen.

4.2.3 Variables Mehrkanalfilter

Sechs gleichlaufend abstimmbare selektive NF-Verstärker bilden ein 6-kanaliges Filter mit einer Güte $Q \geq 25$ im Bereich 1...20 kHz.

4.2.4 Gleichspannungsverstärker für elektrostatische Teilchenaufhängung

Ein hybrider Verstärker mit einem Verstärkungsgrad $g = 0,7 \cdot 10^6$ liefert Ausgangsspannungen bis ± 2 kV symmetrisch in eine hochohmige Last (Ablenkplatten) im Frequenzbereich 0...1 kHz.

4.3 Impulstechnik

4.3.1 Impulsverzögerungsgerät 0,5 μ s ... 10 ms

Dieses Gerät ist als Standardgerät zum Ersatz der bisherigen 4 Zeitverzögerungsgeräte entwickelt worden. Es ist mit Ausnahme der Ausgangsstufen in Halbleitertechnik aufgebaut. Die Verzögerung kann in 4 Zehnerstufen und mit Präzisionspotentiometer stetig eingestellt werden. Der Einstellfehler liegt im kleinsten Bereich unter 1 %; sonst unter 0,5 % im Temperaturbereich von 20°...60°C.

4.3.2 Licht-Triggereinrichtung zur Entkopplung von Triggersignalen

Das Gerät wurde speziell zur Übermittlung von Triggersignalen in Meßkabinen hinein oder über Hochspannungspotentiale hinweg gebaut. Es ist auch für Meßwertübertragungen geeignet. Die Lichtübertragung geschieht mit GaAs-Lumineszenz-Diode, Fiberglas-Lichtleiter und schnelle Photodiode. Die Signalverzögerung ist nur 100 ns.

4.3.3 Stromimpulsgenerator

Zur Untersuchung von supraleitenden Materialien wurde ein Stromstoßgenerator benötigt, der definierte Gleichstromstöße von 100...1000 A in eine Last von 300 m Ω für Pulslängen von 5...100 μ s bei Dachschräge kleiner als 5 % abgibt.

4.4 Überwachungsgeräte - Steuergeräte

4.4.1 Überwachungsgerät für das 110 kV-Netz

Zur Beobachtung der Spannungsunruhe des 110 kV-Netzes wurde ein Gerät entwickelt, das bei schnellen positiven und negativen Spannungsabweichungen - einstellbar zwischen 0,2 und 2 % - ein Relais betätigt. Außerdem ist eine oszillographische Überwachung des zeitlichen Spannungsverlaufes möglich, der bei Überschreiten der zulässigen Nennwerte durch eine Kamera registriert wird.

4.4.2 Schneller Hochspannungsschalter 100 kV 1 A

Die Hochspannungsversorgung des Duoplasmatrons wird mit einer Hochvakuumtriode in Reihe zum Verbraucher gegen Kurzschluß und Überstrom gesichert.

Das Gerät schaltet innerhalb $6 \mu\text{s}$ Überströme von $0,1 \dots 1 \text{ A}$ bei Spannungen bis 100 kV ab. Eine eingebaute Automatik versucht jeweils nach $20 \mu\text{sec} - 30 \text{ msec}$ bis zu 3 mal innerhalb $0,1 - 1 \text{ sec}$ wieder einzuschalten. Dadurch werden Betriebsunterbrechungen durch kurzzeitige Überschläge vermieden. Zusätzliche Überwachungseinrichtungen sollen eine hohe Betriebssicherheit gewährleisten.

4.4.3 Ladespannungswächter (Ersatz für Meßcontacter)

Für die "Meßcontacter", mit denen bisher die Aufladung von Kondensatorbatterien gesteuert wird, haben wir wegen verschiedener Nachteile dieser Geräte ein elektronisches Steuergerät entwickelt, dessen Meß- und Abschaltfehler unter $0,5 \%$ liegt; es besitzt umschaltbare Polarität und eine Korrekturmöglichkeit von $\pm 5 \%$ zum Abgleich der Meßwiderstände. Es ist in einen $1/4$ Istep-Einschub eingebaut und soll in die Standardreihe aufgenommen werden.

4.5 Bildwandler

4.5.1 7-Bildeinschub

Ein neuer Einschub für die EL 085-Kamera steht vor der Fertigstellung.

Projektierte Daten: 7- bzw. 3-Bild-Betrieb

Öffnungszeiten: $0,05 \dots 10 \mu\text{s}$ in 1,2,5,10 Stufen
 Zeitintervalle: $0,9 \dots 109 \mu\text{s}$ im 7-Bild-Betrieb
 maximal $218 \mu\text{s}$ (intern) im 3-Bild-Betrieb
 externe Auslösung ist möglich.

Mit Ausnahme der Bildpuls-Endstufe ist der Aufbau in Halbleitertechnik ausgeführt.

4.5.2 Langsamer Sweep-Einschub

Für etwas abgeänderte Kameras wurde ein langsamer Sweep-Einschub mit Zeitmaßstäben von $5 \dots 200 \mu\text{s}$ ($25 \dots 1000 \mu\text{s}$ Bildzeit) entwickelt.

4.5.3 Prototyp neuer Bildwandler

Der Prototyp eines kleineren und leichteren Bildwandlers wurde konstruiert und aufgebaut. Es wurden außer dem Bildwandlerkopf mit um 90° drehbarer Röhre, ns-Dreibild, μs -Dreibild und Sweep-Einschub aufgebaut und durchgemessen. Es wurden bei den neuen Geräten weitgehend Halbleiterbauelemente eingesetzt. Die erreichten Daten sind gegenüber den alten Geräten teilweise verbessert.

4.5.4 Licht-Triggereinrichtung für Bildwandler

Eine Schaltung mit der Photodiode SD 100 und Avalanche-Transistoren löst das erste Bild des ns-Einschubs mit einer maximalen Verzögerungszeit von 30 ns nach dem Laserimpuls aus.

4.5.5 Weiterentwicklung

Untersuchung der Auflösung der Bildwandlerröhre 4449 A bei kurzen Belichtungszeiten mittels Mehrfachbelichtung ergab, daß die Verschlechterung der Auflösung zum überwiegenden Teil von Überbelichtung herrührt und nicht von den nichtidealen Öffnungsimpulsen. Deshalb ist die Entwicklung einer lichtstärkeren Rückkamera unbedingt erforderlich.

4.6 Rubin-Laser

4.6.1 Doppelpulsmethode für passiven Q-Switch-Betrieb

Zur Reduzierung des Jitters beim passiven "Giant-Pulse"-Betrieb wurde die Doppelpuls-Entladung der Pumplichtquelle untersucht und darüber berichtet [IPP 4/34].

4.6.2 Zweistufiger Hochleistungslaser

Ein Rubinlaser für hohe Ausgangsleistung im Giant-Pulse-Betrieb durch Serienschaltung von 2 zylinderelliptischen Laserköpfen (Rubinkühlung durch Leitungswasser) wurde für Plasma-Aufheizexperimente gebaut. Typische Daten bei Verwendung von Krypto-Cyanin als Schalter sind:

Eingangsenergie:	2 x 4 kJoule
Ausgangsenergie:	≤ 6 Joule \rightarrow 500 MW Leistung
Pulsbreite:	ca. 12 ns
Winkeldivergenz:	ca. 4...8 mrad

4.7 Sonstige diagnostische Geräte

4.7.1 Ortungsverfahren der Normalübergänge an supraleitenden Spulen

Die im letzten Jahr begonnene Entwicklung eines Reflexionsortungsverfahrens wurde weitergeführt.

4.8 HF-Generatoren

4.8.1 1,5 MW-Impulssender

Ein neuer Lastkreis für das Experiment "SELENE" wurde berechnet und konstruiert.

4.8.2 100 W-Generator

Ein kommerzieller kW-Sender wurde zu einem Dauerstrichgenerator für den Frequenzbereich 5...20 MHz mit symmetrischem Ausgang umgebaut.

4.9 Ausstellungsobjekt "ISAR I"

Für die Weltausstellung in Montreal wurde eine Licht- und Schallquelle zur Simulierung einer Thetapinch-Entladung für das Modell "ISAR I" gebaut.

4.10 Konstruktive und optische Arbeiten

Im Zusammenhang mit Bildwandler- und Laserentwicklung wurde eine Reihe von konstruktiven und optischen Aufgaben gelöst, unter anderem Lichtleiter-Kupplung, Lichtteiler als definierter Lichtabschwächer, Objektivanflanschung an Bildwandler, Prüfung von lichtstarken Objektiven (1:0,75...1:1,9) auf Verwendbarkeit in der Bildwandler-Rückkamera, Entwicklung eines strahlaufweitenden Linsensystems (Teleskop) für Kopplung von zweistufigen Lasern.

4.11 Service

Es wurden 680 Geräte repariert und gewartet. Hierbei entstanden Ersatzteilkosten in Höhe von DM 16 391,17. An allen neu eingegangenen Geräten wurde eine Wareneingangsprüfung durchgeführt.

5. Magnetfeldtechnik

5.1 Supraleitende Magnetfelder

5.1.1 Untersuchungen an einzelnen Supraleitern

Um das Verhalten von Supraleitern im Hinblick auf ihre Verwendung in der Magnetfeldtechnik repräsentativ schon an kurzen Proben untersuchen zu können, wurde eine Reihe von Meßverfahren neu entwickelt oder erweitert.

Die bereits früher begonnenen Homogenitätsmessungen an der Kupferplattierung supraleitender Drähte wurden fortgesetzt und auch auf hochstabilisierte Kabel ausgedehnt.

Da die Magnetisierungskurve von Supraleitern die Beurteilung der I_c - H_c Charakteristik auch ohne Transportstrom zuläßt, wurde auf Magnetisierungsmessungen besonderer Wert gelegt. Die longitudinale Magnetisierung ließ sich dabei mit ausreichender Genauigkeit erfassen. Gleichzeitig war es möglich, das "Flußsprung"-Verfahren einzelner NbZr- und NbTi-Drähte und Kabel miteinander zu vergleichen.

Magnetisierungsmessungen im transversalen Magnetfeld, das dem wirklichen Anwendungsfall entspricht, führten wegen der kleinen Abmessungen der untersuchten Drähte noch zu keinem befriedigenden Ergebnis.

5.1.2 Stabilisierte Supraleiter

An einer Reihe von supraleitenden Kabeln, die in eigener Werkstatt hergestellt worden waren, wurden Stabilitätsuntersuchungen angestellt. An kleinen einlagigen Spulen konnten bei Stromstärken bis zu 700 A Wärmeübergangszahlen bis zu einer Grenze (zwischen Kabel und fl. Helium) von 0,4 - 0,6 W/cm² ermittelt werden.

5.1.3 Supraleitende Spulen und impulsförmige Magnetfelder

Im Hinblick auf eine mögliche Kombination von stationären supraleitenden und impulsförmigen Magnetfeldern wurde mit einer Reihe von Versuchen über den Einfluß hochfrequenter Magnetfelder auf das Verhalten von harten Supraleitern begonnen. Eine kleine Kondensatorbatterie zusammen mit einer mit fl. Stickstoff gekühlten Impulsspule sowie eine äußere wassergekühlte Magnetfeldspule erlauben Untersuchungen an Kurzproben und Musterspulen aus verschiedenen Supraleitern in Impulsfeldern bis zu 200 kG bei einer maximalen Entladefrequenz von 100 kHz und einem dazu überlagerten stationären Feld bis zu 40 kG.

5.1.4 Anwendung in der Plasmaphysik

Supraleitende Spulen und insbesondere großvolumige Spulenanordnungen kommen für die Anwendung in der Plasmaphysik dann in Frage, wenn sie im Vergleich zu den derzeit verwendeten wassergekühlten, normalleitenden Spulen billiger in der Anschaffung und im Verbrauch und ähnlich flexibel im Aufbau und in der Betriebsweise sind.

Zur Frage der einmaligen und laufenden Kosten wurden an Hand einiger Beispiele vergleichende Betrachtungen angestellt. Demnach werden supraleitende Magnetfeldanordnungen dann von Interesse sein, wenn Betriebszeiten bzw. Einschaltzeiten des Magnetfeldes von mehr als einigen Sekunden gefordert werden.

Da in nächster Zukunft auch in der Plasmaphysik mit längeren zeitlich stationären Magnetfeldern gerechnet werden muß, wurde auf Grund dieser Überlegungen mit der Ausarbeitung eines Projektes zum Bau großer supraleitender Magnetfeldspulen begonnen.

Die im Zusammenhang mit den Arbeiten auf dem Gebiet der Supraleitung erforderliche allgemeine Tieftemperaturtechnik nahm im vergangenen Jahr einen beträchtlichen Teil der Arbeitszeit in Anspruch. Hierzu gehörte insbesondere die Installation und Inbetriebnahme eines neuen Heliumverflüssigers, die mehrfache Reparatur der alten Anlage und die Einrichtung neuer Laborplätze.

5.2 Wassergekühlte Spulen für stationäre und kurzzeitige Magnetfelder

5.2.1 Serienmäßige Magnetfeldspulen

Neben der Abwicklung mehrerer Aufträge über serienmäßige Spulen, vor allem der Typen Sp 300a und Sp 300/12, wurden Einzelprüfungen an den fertiggestellten Spulen und einige Grenzbelastungsproben vorgenommen.

Insbesondere wurde der gegenüber der bisherigen Ausführung mit einem vergrößerten Kühlkanal versehene Spulentyp Sp 300a kurzzeitig bis zu 3500 A belastet. Das entspricht - bei einer dichten Schichtung mehrerer solcher Spulen - einer Feldstärke von 33 kG.

Der Spulentyp Sp 300/12 wurde mit Rücksicht auf die Spannungsbeanspruchung bei Impulsbetrieb mit einem Hartgeweberahmen (bisher Metallrahmen) versehen.

5.2.2 Stabaufhängung für Oktopol-Torus

Für die dipolförmige Stabaufhängung bzw. Stromzuführung wurden Modellversuche zur Feststellung der maximal erreichbaren Stromdichte vorgenommen. Dabei konnten im Leitermaterial stationäre Stromdichten bis zu 700 A/mm^2 erreicht werden (Kühlkreislänge ca. 30 cm).

5.2.3 Helische Windungen für Torus W II

Der Aufbau der helischen Windungen machte einige Vorversuche nötig und zwar sowohl im Hinblick auf die Stabkühlung als auch auf die Stabisolation, an deren Temperaturfestigkeit besondere Anforderungen gestellt sind.

Zusammen mit anderen Gruppen wurde der Aufbau der Wicklung vorbereitet und zum Teil fertiggestellt und geprüft.

5.2.4 Wassergekühlte Spulen für hohe Magnetfelder

Für allgemeine Materialuntersuchungen, insbesondere auf dem Gebiet der Supraleitung, wurde eine Spule aus Kupferband fertiggestellt und zum Teil erprobt, deren freier Durchmesser 3 cm beträgt und die für Feldstärken bis über 100 kG verwendbar sein soll. Daneben wurde versuchsweise die Fertigung von radial gekühlten Scheibenspulen des Bitter-Typs in Angriff genommen.

5.3 Impulsförmige Magnetfelder

5.3.1 Versuche an niederwindigen Impulsspulen

An einer Reihe von niederwindigen Impulsspulen für Felder bis 300 kG wurden Untersuchungen über die mechanische Festigkeit und über die Leitfähigkeit der stromführenden Schicht angestellt.

In Zusammenarbeit mit der Gruppe Chemie wurden dabei erstmals Stahlspulen mit aufgalvanisierter Silber-Leitschicht angefertigt und sowohl bei Raumtemperatur als auch in fl. Stickstoff-Bad, also bei etwa 80°K erprobt. Dadurch war eine wesentliche Verbesserung einerseits der mechanischen Festigkeit und andererseits der effektiven Leitfähigkeit zu erzielen.

5.3.2 Eieruhr-Magnetfeld

Im Laufe des vergangenen Jahres wurde zu einigen modifizierten Eieruhr-Spulen die Magnetfeldgeometrie bzw. der Feldlinienverlauf berechnet. Eine Reihe dieser Spulen bzw. Probespulen wurde angefertigt oder ihre Fertigung vorbereitet. Dazu gehören Probespulen mit einer "durchsichtigen" Wicklung, die die Beobachtung des Plasmas auf der ganzen Länge der Spule erlauben und eine gekrümmte Spule in Form eines Torussegmentes.

5.4. Magnetfeldberechnung

Für eine Reihe von Magnetfeldanordnungen wie "SELENE", "LANGER BOGEN", "ALMA" etc. wurden Magnetfeldberechnungen durchgeführt.

Daneben wurde ein Programm zur Berechnung von Magnetfeldern, Kräften, Wechsel- und Selbstinduktivitäten von rotationssymmetrischen Stromkreis-Systemen mit Hilfe der vollständigen elliptischen Integrale 1., 2. und 3. Gattung entwickelt.

5.5 Magnetfeld-Meßtechnik

Insbesondere im Zusammenhang mit der Tieftemperaturtechnik war die eigene Entwicklung und Erprobung geeigneter Meßverfahren erforderlich. Das traf neben der Messung von Magnetfeldern mit Hallsonden und Widerstandsplättchen vor allem auch auf die Messung der lokalen Magnetisierung in einzelnen supraleitenden Drähten oder im Wicklungsvolumen supraleitender Spulen und der Temperaturverteilung in solchen Spulen zu.

Daneben wurde ein Verfahren entwickelt, das annäherungsweise die Lokalisierung der "Quench"-Zone in der Wicklung von supraleitenden Spulen erlaubt.

6. Vakuumtechnik/Technologie

Von insgesamt 365 eingegangenen Aufträgen wurden 348 erledigt. Die dabei aufgewendeten Arbeitsstunden verteilen sich auf die einzelnen Abteilungen wie folgt:

Abteilung	Vakuumtechnik/ Technologie	Glastechnik	G e s a m t
1	1 559 Std.	-	1 559 Std. = 12,2 %
2	2 721 Std.	3 356 Std.	6 077 Std. = 47,5 %
3	1 007 Std.	308 Std.	1 315 Std. = 10,3 %
4	352 Std.	780 Std.	1 132 Std. = 8,8 %
5 (ZW)	186 Std.	-	186 Std. = 1,5 %
8 (MPI Ext.P.)	138 Std.	97 Std.	235 Std. = 1,8 %
9 (Lager)	2 305 Std.	-	2 305 Std. = 17,9 %
<u>Aufträge</u>			
eingegangen	179	186	365
erledigt	164	184	348

Die erforderlichen Wartungsarbeiten an den Gasverflüssigungs-Anlagen nahmen 342 Stunden in Anspruch.

6.1 Vakuumapparatur für SELENE I

Bei der Dimensionierung der Vakuumanlage sowie der Gestaltung von Bauteilen für dieses Projekt wurden in Zusammenarbeit mit der Gruppe Konstruktion II konstruktive und technologische Details bearbeitet.

6.2 Einrichtung zum Innenbedampfen eines Entladungsrohres

Das Bedampfen der Innenfläche eines 1,5 m langen Entladungsrohres mit einer Platinschicht von 300 Å Dicke erforderte die Konstruktion und den Bau einer Einrichtung, die es gestattet, eine über die ganze Länge möglichst gleichmäßige Schicht aufzubringen. Dazu wird das Rohr während eines Bedampfungsvorganges gedreht; die Verdampferquelle wird gleichzeitig längs der Rohrachse bewegt.

6.3 Ausheizbare, unmagnetische Metall-Keramik-Verbindungen

Die metallischen Anschlußteile der üblichen MK-Verbindungen sind aus Werkstoffen gefertigt, deren Ausdehnungskoeffizient möglichst weitgehend an den der verwendeten Keramik angepaßt ist. Für diesen Zweck eignen sich vorwiegend Legierungen wie FeNiCo, FeCr u.ä. Da diese Werkstoffe durchwegs eine relativ hohe Permeabilität aufweisen, ist der Einsatz solcher Verbindungen in vielen Fällen nicht möglich.

Es wurde deshalb mit der Entwicklung von MK-Verbindungen begonnen, deren Anschlußteile aus einem Material mit einer Permeabilität nicht über $\mu_{\text{rel}} = 1,01$ G/Oe gefertigt sind. Dazu eignen sich ausgesuchte Bleche aus rostfreiem Stahl vom Typ 1.4301. Durch den, gegenüber der Keramik ($\alpha = 6 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$), stark unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten dieses Stahles ($\alpha = 16 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$), treten bei der Durchführung des Lötprozesses beträchtliche Schwierigkeiten auf. Erste Muster haben jedoch gezeigt, daß es bei geeigneter Gestaltung der Teile trotzdem möglich ist, derartige Verbindungen herzustellen.

6.4 Verfahren zur Herstellung von Druckfunkenstrecken-Gehäusen aus Gießharz

Zur Herstellung von 80 Gehäusen für Druckfunkenstrecken aus Gießharz wurden 4 Gießformen angefertigt. Die Gehäuse werden aus einem mit Quarzmehl gefülltem Harztyp gefertigt. Voraussetzung für die Erzielung einer möglichst hohen Spannfestigkeit ist eine vollständige Entgasung der Gießmasse vor dem Vergießen. Da dies bei quarzmehlgefüllten Harzen mit den üblichen Verfahren praktisch nicht möglich ist, wurde eine Einrichtung geschaffen, die es gestattet, die Gießmasse in dünner Schicht im Vakuum zu entgasen. Der Gießvorgang selbst erfolgt ebenfalls im Vakuum.

Bei der nachträglich notwendigen Bearbeitung der Dichtflächen hat sich das Schleifen auf einer Vertikalschleifmaschine als beste Bearbeitungsmethode erwiesen.

6.5 Untersuchung von rostfreien Stählen

Die Beschaffung eines Werkstoffes von der Qualität der rostfreien Stähle, mit einer garantierten Permeabilität von $\mu_{rel} \leq 1,01 \text{ G/oe}$, war der Anlaß für die Untersuchung einer Reihe von Schmelzproben, die zu diesem Zweck von den einschlägigen Stahlfirmen angefordert wurden. Bedingung war, daß die vorgeschriebenen Werte nicht nur im lösungsgeglühten Zustand (Anlieferungszustand) erreicht werden, sondern daß diese auch bei einer Kaltverformung des Materials und insbesondere beim Schweißen nicht über die höchstzulässigen Werte hinaus ansteigen. Die Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen.

Gleichzeitig wurde nach der Ursache der immer wieder, besonders bei dünnwandigen Drehteilen aus Stangenmaterial, festzustellenden Undichtigkeiten gesucht. Diese treten vorwiegend dann in Erscheinung, wenn die Teile einer Temperaturbelastung (Ausheizen, Schweißen u.ä.) ausgesetzt waren. Dabei konnte festgestellt werden, daß die Undichtigkeiten bei den stabilisierten Stählen vorwiegend von Steigerungen der Ti-Nitride bzw. -Karbonitride, bei den nicht stabilisierten Stählen von Oxyd- bzw. Karbidzeilen verursacht werden. Eine in diesem Zusammenhang durchgeführte Untersuchung von im Vakuum umgeschmolzenen Proben ergab, daß durch den dabei erzielten höheren Reinheitsgrad und die gleichmäßige Verteilung der nichtmetallischen Einschlüsse das Auftreten von Undichtigkeiten vermieden werden kann.

6.6 Schweißverbindung Molybdän - 18/9 Stahl

Mit der genannten Werkstoff-Paarung wurden von der Firma Bölkow in unserem Auftrag Versuchsschweißungen durchgeführt und anschließend bei uns auf ihre Brauchbarkeit hin untersucht.

Die Proben bestanden aus 18/9 Stahl-Büchsen, die mit Rohrstücken aus Molybdän durch Elektronenstrahlschweißung stirnseitig miteinander verbunden wurden. Die metallographische Untersuchung der Proben ergab, daß die Bindung zum Molybdän hin durch das Auftreten intermetallischer Verbindungen (J.V.) stark beeinträchtigt ist. Diese Metallide entstehen vorwiegend durch die begrenzte Löslichkeit der Legierungsbestandteile Ni und Fe des 18/9 Stahles im Molybdän. Sie sind äußerst hart und spröde und mindern die Festigkeit der Schweißstelle erheblich. Vereinzelt konnte auch eine in der spröden Zone beginnende Haarrißbildung festgestellt werden. Der Härteverlauf quer über die Schweißstelle ist im Bild dargestellt. Weitere Versuche sollen zeigen, ob durch das Mitverschweißen von Puffermaterialien bessere Ergebnisse erzielt werden können.

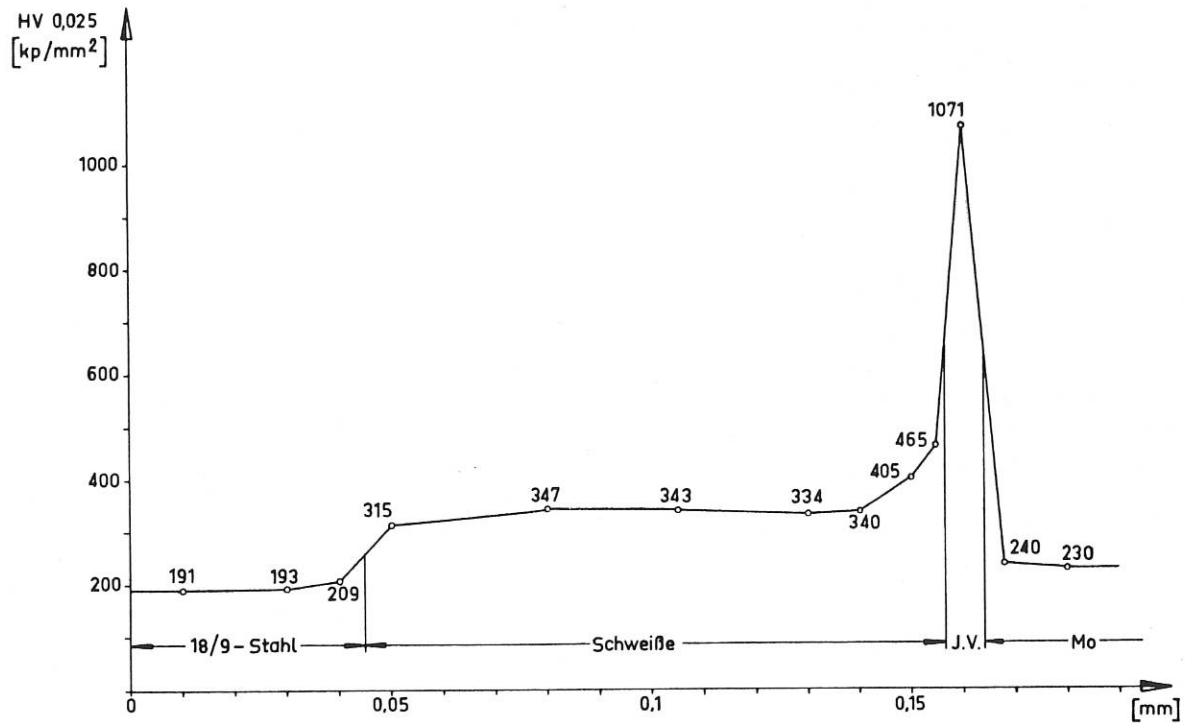


Abb. 31: Härteprofil der Elektronenstahl-Schweißverbindung Molybdän mit 18/9-Stahl

6.7 Allgemeine Materialuntersuchungen

Metallographische Untersuchung von Löt- und Schweißverbindungen, Feststellung von Materialfehlern.

Prüfung von Druckfestigkeit und Schlagzähigkeit von glasfaserverstärkten Polyesterharzen.

Prüfung thermoplastischer Kunststoffe.

6.8 Sonstige Arbeiten

Aufdampfen von reflexionsmindernden Schichten auf Laser-Rubine.

Bedampfen von optischen Teilen wie Linsen, Prismen sowie von Szintillatoren.

Brennen von Agalmatolit-Teilen.

6.9 Glastechnische Arbeiten

Es wurden unter anderem gefertigt:

- 7 Zweikammer-Röhren
- 2 Farvitron-Röhren
- 2 Farvitron-Systemaufbauten
- 2 Röhren für 90⁰-Massenspektrometer
- 112 Keramik-Glas-Sonden
- 58 Sinterglas-Stiftsockel
- 2 Quarz-Diffusionslecks
- 4 Bi-Destillations-Anlagen
- 30 Halterungen für Laser-Rubine
- 9 Entladungsrohre
- 1 Gasabsorptions-Apparatur

Außerdem wurden Änderungen an diversen glastechnischen Geräten durchgeführt.

7. Installationstechnik

7.1 Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von Geräten

- 6 Hochstrom-Gleichrichteranlagen für Galvanik
- 3 Ladegeräte 50 kV 10 mA
- 1 Ladegerät 25 kV 1 A
- 1 Ladegerät 25 kV 30 mA
- 1 Netzgerät 10 kV 0,75 A
- Steuerung für die Ladeanlagen der 500 kJ-Batterie
- Steuerung für die Ladeanlagen der Turbulenz-Batterie
- Steuerung und Überwachung für Drahtgalvanisierungsanlage
- Glättungseinrichtung für Hg-Gleichrichteranlage in L 3
- Erweiterung der Si-Gleichrichteranlage L 3

7.2 Inbetriebnahmen

- Bremseinrichtung für 50 MVA-Stoßumformer
- Stoßlastschaltanlage (E-Zentrale) nach erfolgtem Umbau.

7.3 Projektierte Anlagen

- Schaltanlage für Maschinenhaus L 3
- Änderung des Spannungsreglers des Diesel-Notstromaggregates in T 1
- Anschluß Laborhalle L 4 an Hg-Gleichrichteranlage 6 und 7 in L 5
- Anschluß X 2 b und X 2 c
- Installation des Galvanikraumes.

8. Chemie

8.1 Fertigungsaufträge

Im vergangenen Jahr gingen 305 Fertigungsaufträge ein, aus dem Vorjahr wurden weitere 6 übernommen. Davon wurden 298 bearbeitet und abgeschlossen und dafür insgesamt 2148 Arbeitsstunden aufgewandt.

In der folgenden Übersicht wird die Verteilung von Aufträgen, dafür aufgewendete Stunden und der entsprechende Prozentsatz der Gesamtstunden auf die einzelnen Abteilungen des Instituts bezogen wiedergegeben:

Abteilung	1	2	3	4	(ZW)	(MPI Extrat. P.)
Fertigungsaufträge	32	84	27	78	13	64
Arbeitsstunden	536	413	205	523	43	467
in % der Gesamtstunden	24	22	9	23	2	20

8.2 Elektropolierverfahren

Etwa 10 % aller Fertigungsaufträge (29) betrafen Elektropolierarbeiten. Mit 311 Arbeitsstunden, die dafür aufgewandt wurden, lag die durchschnittliche Bearbeitungszeit pro Auftrag um fast 50 % über dem Mittel von etwa 7 Stunden pro Fertigungsauftrag. Dieser Mehraufwand wurde durch die notwendige Anfertigung von Hilfsanoden, isolierten Aufhängungen und dergleichen verursacht.

Die Nachfrage nach elektrolytisch polierten Oberflächen verschiedenster Arten stieg 1966 stark an. Es waren sowohl große Stückzahlen (z.B. 265 Cu-Kalotten für Funkenstrecken) als auch interessante Einzelstücke (z.B. Vacon, Fe/Co-Legierung, Cu-Einkristalle) elektrolytisch zu polieren.

8.3 Betonklotz für die Kollektorverlängerung

In Zusammenhang mit den Gruppen Projektierung und Konstruktion und dem Baureferat wurde die Armierung der beiden Betonklötze für die Kollektorverlängerung vorbereitet.

8.4 Beschaltungskondensator

In Zusammenarbeit mit der Gruppe Hochspannungstechnik wurden mehrere Hundert aluminiumbedampfte Hostaphanfolien für einen Beschaltungskondensator geringer Abmessung präpariert. In diesem Zusammenhang stand auch die Entwicklung eines Verfahrens zur direkten galvanischen Metallisierung von Polyesterfolien, insbesondere von Terephthalsäurepolyglykolestern, also Hostaphan bzw. Mylar.

Bei der Erprobung des Kondensators traten Glimmentladungen auf, die zur Bildung von Wasserstoff im Tränkmittel führten. Es wurde an einer Möglichkeit gearbeitet, den Wasserstoff durch einen Zusatz zum Tränkmittel chemisch zu binden.

8.5 Galvanotechnik der Edelmetalle

Das Verfahren zur ausheizbaren, lufteinbruchsicheren und haftfesten Vergoldung von Wolfram und Molybdän wurde auf Edelstahl, Vacon und Tantal erweitert. Überzüge aus Platin, Rhodium und Iridium konnten auf den genannten Metallen ebenfalls abgeschieden werden. Die Hartvergoldung von steckbaren gedruckten Schaltungen hat 1966 großen Umfang erreicht. Da die galvanische Abscheidung dicker Hartgoldschichten (über 10 μ) nicht unproblematisch ist, trat in jüngster Zeit die Veredelung durch Platin und sogar durch Rhodium mehr hervor. Aus diesem Grunde wurden auch Rhodinierverfahren in das Fertigungsprogramm mit aufgenommen. Gleichzeitig begannen wir mit der Entwicklung eines Goldbades, das die Abscheidung dickerer Hartgoldüberzüge als 10 μ ermöglicht. Ein erster Schritt in dieser Richtung war die Ausarbeitung eines Analysenverfahrens, das es erlaubt, nicht nur den Goldgehalt des Elektrolyten möglichst genau zu bestimmen, sondern auch den Gehalt an Begleitmetallen wie Silber, Kupfer, Nickel, Kobalt und Eisen, von denen einige nur spurenweise enthalten sein können.

8.6 Stabilisierung von Supraleitern durch Cu-Ummantelung

Im vergangenen Jahr wurde die von uns in Zusammenarbeit mit der Gruppe Konstruktion entwickelte Anlage zur kontinuierlichen Verkupferung supraleitender Drähte in der Zentralwerkstätte fertiggestellt und in Betrieb genommen. Bis jetzt wurden damit insgesamt etwa 1500 m Nb/Zr-Draht 25 μ dick verkupfert.

Darüber hinaus ist die Anlage so ausgelegt, daß ohne Umbauten auch andere Oberflächenverfahren wie Beizen, Reinigen, Aufgalvanisieren von Silber, Nickel oder Gold möglich sind.

8.7 Bautenschutz

Ein Verfahren zur Abdichtung der Mörtelfugen in den Klinkerfassaden der Institutsbauten wurde ausgearbeitet. Auf der Basis von siliziumorganischen Verbindungen, die beim Aufbringen auf die Fassaden noch wasserlöslich sind, konnte neben einer weitgehenden Hydrophobierung der Fassaden in den Mörtelfugen eine wasserundurchlässige, wohl aber wasserdampfdurchlässige Sperrschicht aufgebaut werden. Die Fassaden mußten dabei, je nach Ausgangszustand, 2 bis 3 mal behandelt werden. In 2 besonders gelagerten Fällen wurden siliziumorganische Systeme in organischen Lösungsmitteln aufgebracht.

8.8 Galvanikeinrichtung

Mit der Einrichtung einer neuen Galvanik in der Heizzentrale wurde begonnen. Das Elektrolytvolumen der galvanischen Bäder beträgt einheitlich 210 l und zwar für die elektrolytische Entfettung, Kupfer, Nickel, Chrom, Cadmium, Silber und die entsprechenden Vor- und Nachbehandlungsbäder. Weitere Geräte dienen der Lösemittelentfernung, Beiz- und Gelbbrenne, Brünierung und Trocknung in einem Umlufttrockenofen und einer Zentrifuge. Zum elektrolytischen Polieren von Edelstahl steht eine 600 l fassende bleiausgekleidete Wanne zur Verfügung. Die anfallenden Spülwässer und Konzentrate werden direkt in die entsprechenden Entgiftungsbehälter einer automatisch arbeitenden Entgiftungs- und Neutralisationsanlage geleitet.

Die Galvanik wird ab Mitte Februar 1967 betriebsbereit sein.

9. Zentralwerkstätten9.1 Mechanische Werkstätten und Schreinerei

Im Laufe des Jahres 1966 erhöhte sich die Zahl der Beschäftigten in diesen Bereichen um 22 % von 72 auf 88 bei 9 Abgängen und 25 Zugängen. Am 1. September 1966 wurde eine Lehrwerkstatt für Mechaniker, Feinmechaniker und Dreher eröffnet.

Belegschaftsverteilung auf die Werkstattbereiche per 31.12.1966

Mechanik	32
Feinmechanik	15
Schlosserei und Schweisserei	15
Kunststoffwerkstatt	3
Revision	2
Werkzeuglager und Helfer	4
Arbeitsvorbereitung und Werkstattbüro	5
Schreinerei	8
Lehrwerkstatt	<u>4</u>
insgesamt	88

Bearbeitung der Fertigungsaufträge

Übertrag von 1965	81 Aufträge
Eingang 1966	835 Aufträge
Ausgeführt 1966	<u>841 Aufträge</u>
Übertrag von 1966	75 Aufträge

Ausgeführte Aufträge

		<u>Interne Aufträge</u>	<u>Externe Aufträge</u>
Anzahl	841	767	74
%	100	91,2	8,8

Die Kosten für die 74 externen Aufträge betragen DM 320 435.--.

Stundenvergleich

	<u>Gesamt</u>	<u>Interne Aufträge</u>	<u>Externe Aufträge</u>
Stunden	97 038	78 189	18 849
%	100	80,6	19,4

Jahresbilanz der geleisteten Arbeitsstundena) Mechanische Werkstätten

Gesamtstunden: 78 189

Abteilung	1	2	3	4	5 ZW	6	7	MPI f. Extrat. Physik	Lager
Soll in %	35	23	20	12	-	1	1	3	5
	27	24	24	14	-	0,25	0,25	9	1,5
Soll-Stunden	22040	18648	18300	10717	-	283	283	6340	1778
Ist-Stunden	30888	18086	15118	6376	1742	14	628	5131	206
%	40	23	19	8	2	-	0,8	7	0,2

b) Schreinerei

Gesamtstunden: 9 225

Abteilung	1	2	3	4	5 ZW	6	7	MPI f. Extrat. Physik	Lager
Soll in %	35	23	20	12	-	1	1	3	5
	27	24	24	14	-	0,25	0,25	9	1,5
Soll-Stunden	2593	2201	2162	1263	-	35	35	754	182
Ist-Stunden	2934	1436	1559	1234	1201	354	496	11	-
%	32	16	17	13	12	4	6	-	-

74 der insgesamt in der Arbeitsvorbereitung bearbeiteten 841 Fertigungsaufträge wurden an Fremdwerkstätten vergeben. Die Fertigungskosten dafür betragen DM 320 435.--. Das entspricht bei Ansatz eines mittleren Stundenpreises von DM 17.-- einer Fertigungszeit von etwa 19 100 Stunden. Damit ergibt sich die gesamte vom Institut während 1966 für die Fertigung mechanischer Teile in Anspruch genommene Zeit zu 97 300. Davon wurden 80 % in der Zentralwerkstatt, 20 % in Fremdwerkstätten geleistet.

9.2 Zentrale Elektrowerkstatt

Anzahl der Beschäftigten per 31.12.1966: 15

Jahresbilanz der geleisteten Arbeitsstunden

Gesamtstunden: 18 558

Abteilung	1	2	3	4/5	8	Lager
vorgegebener Kapazitätsanteil	27%	24%	24%	14%	9%	2%
beanspruchter Kapazitätsanteil	58,5%	22,3%	1,5%	10,7%	0,5%	6,5%
geleistete Arbeitsstunden	10877,5	4110,5	269	1989,5	102	1209,5

In der Elektrowerkstatt wurden insgesamt 105 Aufträge bearbeitet bzw. abgeschlossen. Es handelt sich hierbei in der Hauptsache um die Herstellung von Einzelgeräten, die eine individuelle Bearbeitung erforderten. Auf das Jahr 1967 mußten unerledigte Aufträge über etwa 3000 Arbeitsstunden übertragen werden.

9.3 Zentrale Elektronikwerkstatt

Anzahl der Beschäftigten per 31.12.1966: 10

Jahresbilanz der geleisteten Arbeitsstunden

Gesamtstunden: 14 219

In dieser Werkstatt werden im größeren Umfange Geräte in Serie gebaut. Diese Geräte gelangen über ein Fertiglager an die Verbraucher.

7028,5 Arbeitsstunden wurden für die Fertigung von Seriengeräten aufgewandt und 6878 Stunden verteilten sich direkt auf die einzelnen Abteilungen.

Abteilung	1	2	3	4	6/7	MPI f. Extrat. Physik
vorgegebener Kapazitätsanteil	27%	24%	24%	14%	2%	9%
beanspruchter Kapazitätsanteil	9%	53%	5%	33%	-	-
geleistete Arbeitsstunden	617,5	3630,5	338,5	2288	1	3

Fertigungsübersicht der Seriengeräte

	intern	extern	bisherige Gesamtpro- duktion
Triggergerät 3,2 kV	-	-	62
Triggergerät 14 kV	-	-	82
Triggergerät 2 x 10 Kanal	-	-	18
Triggergerät 20 Kanal	-	-	7
Impulstrafo 3,2 kV	10	-	384
Impulstrafo 14 kV	-	-	60
Impulsverstärker	-	-	67
Speisegerät 3,2 kV	-	-	31
Speisegerät 14 kV	-	-	82
Ladegerät 2,5 kV	-	-	8
Ladegerät 3/4 kV	-	-	32
Ladegerät 3/4 kV mit Meßkontakter	-	-	10
HS-Gerät 5 kV	-	20	41
Ladegerät 40 kV, wechselbar	4	-	4
Stab. Netzgerät \pm 300 V	10	-	15
Stab. Netzgerät 18/36 V	26	-	26
Heizstromversorgung 10 V/60 A	6	-	14
Leistungsstabilisiertes Netzgerät	1	-	6
Übertrag	57	20	949

	intern	extern	bisherige Gesamtpro- duktion
Übertrag	57	20	949
Wechselspannungs-Stabi 100 VA	13	-	13
Zeitverzögerungsgerät 10 µsec	-	25	60
Zeitverzögerungsgerät 100 µsec	-	25	136
Zeitverzögerungsgerät 1 msec	-	25	85
Zeitverzögerungsgerät 10 msec	-	10	36
Taktgeber 4 x 100 sec	-	-	15
Netzverteiler klein	-	-	31
Netzverteiler 220 V	13	-	35
Netzverteiler 220/110 V	15	-	28
Steckdosenleiste	-	-	300
Pumpensteuerung	10	-	35
Ofensteuerung	-	-	15
Multipliermeßkopf 4	-	-	6
Bildwandler	-	-	15
Gesamt	108	105	1759

Gesamtwert der über das Fertiglager gelieferten Seriengeräte (Lagerbewegung) DM 88 212.--.

Davon entfielen auf die einzelnen Abteilungen:

Abteilung		1	2	3	4	MPI f. Extrat. Physik
Gerätewert	DM	9655.--	36346.--	22443.--	15808.--	3960.--
prozentualer Anteil		11 %	41,1 %	25,5 %	17,9 %	4,5 %

GESCHÄFTSFÜHRUNG UND VERWALTUNG

1. Personelle Entwicklung

Die Zahl der Mitarbeiter stieg - unter Einschluß der Stipendiaten - im Laufe des Berichtsjahres von 729 Personen auf 851 Personen, also um 122.

Hiervon entfielen auf	Anzahl	%
Wissenschaftliche und wissenschaftlich-technische Kräfte	163	19
Technische Hilfskräfte in den Abteilungen und Werkstätten	438	51
Allgemeine Dienste	154	18
Geschäftsleitung und Verwaltung	50	6
Stipendiaten	22	3
Lehrlinge und Zeithilfen	24	3

In dieser Aufstellung sind 18 Bedienstete der Europäischen Atomgemeinschaft und 5 ausländische Gastforscher enthalten; nicht darin erfaßt sind 13 Diplomanden.

Die personelle Entwicklung seit Gründung des Instituts ist in Abb. 32 dargestellt. Die für 1967 angegebenen Zahlen entsprechen dem bereits genehmigten Stellenplan des Wirtschaftsplans 1967, die Zahlen für 1968 den Ansätzen im Vorläufigen Wirtschaftsplan 1968.

2. Baumaßnahmen

Zu Beginn des Berichtsjahres 1966 standen zur Verfügung:

- a) Für die Abteilung Experimentelle Plasmaphysik 1
 - 2 Laborhallen (L 1 und L 2)
 - Werkstatt-Laborgebäude (W 1)
 - Gebäude mit Arbeitsräumen für Wissenschaftler (D 1)
 - 1 Baracke
- b) Für die Abteilung Experimentelle Plasmaphysik 2
 - 2 Laborhallen (L 3 und L 4)
 - Werkstatt-Laborgebäude (W 2)
- c) Für die Abteilung Experimentelle Plasmaphysik 3
 - Laborgebäude (L 5)
 - mit Gleichrichterzentrale (L 5 E)

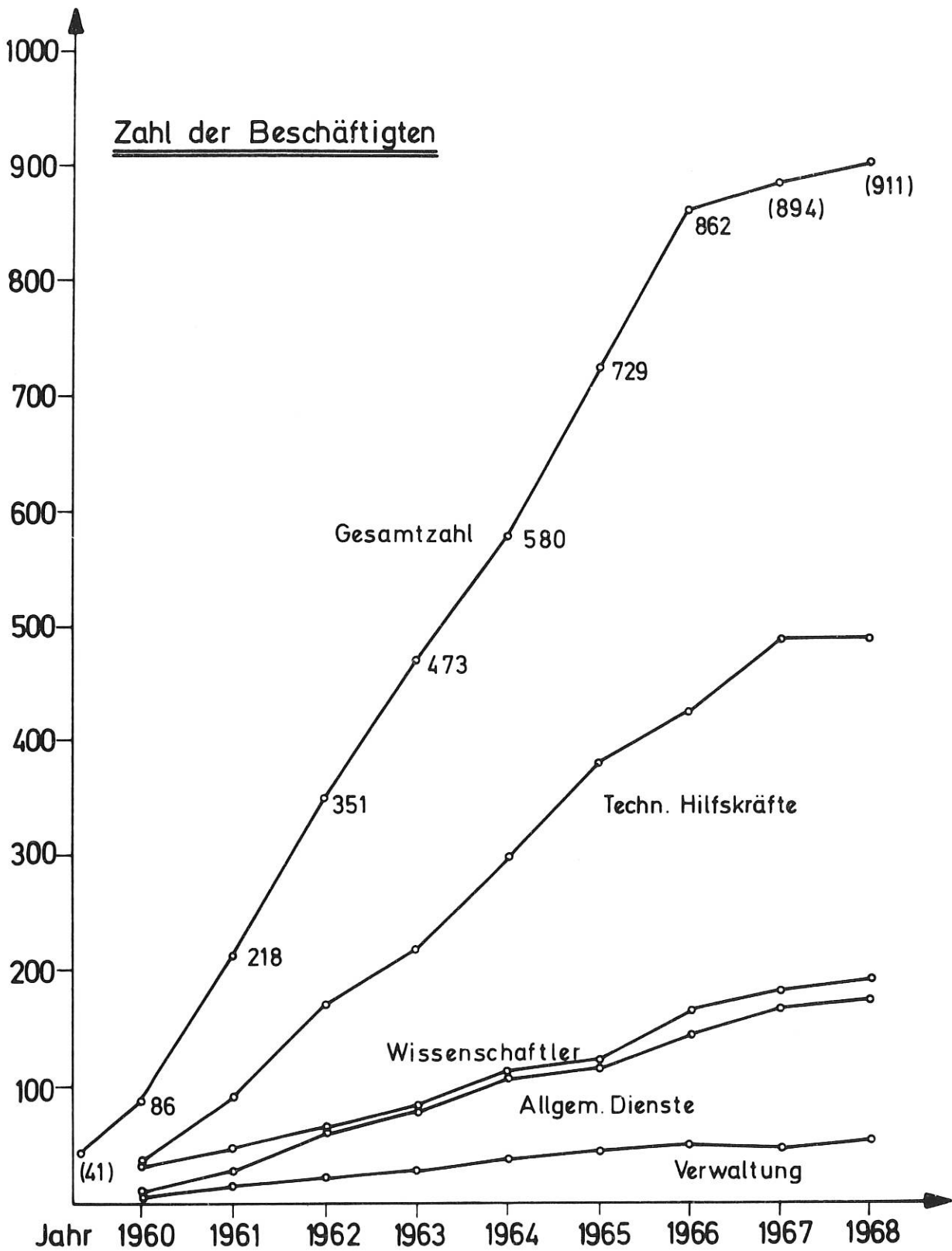


Abb. 32: Personelle Entwicklung

d) Für die Abteilung Technik

Laborgebäude (I 1)
mit Hochspannungshalle

e) Für die Abteilung Theorie

Gebäude mit Arbeitsräumen, Hörsaal, Bibliothek
und klimatisierten Räumen für die Großrechenanlage IBM 7090 (D 2)

f) Zentrale und allgemeine Einrichtungen

Zentralwerkstatt und Zentrallager (ZW)
Energiezentrale (EZ)
Heizzentrale (HZ)

Gebäude für Allgemeine Dienste (T 1)
2 Baracken

Gesamtnutzfläche: 26.651 m²

Im August des Berichtsjahres 1966 wurde die Fahrbereitschaft fertiggestellt.

Im Mai 1966 wurde ein Gebäude mit Arbeitsräumen für Wissenschaftler (D 3) für die Abteilung Experimentelle Plasmaphysik 2 begonnen, das Mitte 1967 bezogen wird. Außerdem wurde im Juni für die gleiche Abteilung ein Anbau an die Halle L 3 zur Aufnahme von Maschinen fertiggestellt.

Lage und Größe der einzelnen Gebäude sind aus dem Lageplan (Abb. 33) und dem Luftbild (Abb. 34) ersichtlich.

Im Berichtsjahr wurde eine 3. Planung für die Kantine durchgeführt. Nachdem das Bundesschatzministerium mit Schreiben vom 23.3.1967 dieser Planung grundsätzlich zugestimmt hat, kann mit einem Baubeginn im November 1967 gerechnet werden.

Außerdem wurde eine 2. Planung für die dringend benötigten Werkdienst- und Gästewohnungen auf dem Institutsgelände erarbeitet, welche die grundsätzliche Zustimmung des BMSchatz mit Schreiben vom 17.2.1967 fand. Mit dem Bau wird am 3.7.1967 begonnen.

Der Erweiterung der Laborfläche für die Abteilung Experimentelle Plasmaphysik 1 dient ein Zwischenbau D 1 A zwischen den Gebäuden D 1 und L 1. Planung und Vorbereitung der Baumaßnahmen wurden im Berichtsjahr abgeschlossen. Der Bau wird im wesentlichen im Jahr 1967 durchgeführt.

Am 13.9.1966 wurde dem BMwF nach eingehender Erörterung die überarbeitete Fassung eines Raumprogramms für das Zentralgebäude vorgelegt. Es kann damit gerechnet werden, daß dieses Raumprogramm im Laufe des Jahres 1967 grundsätzlich genehmigt wird.

Im Berichtsjahr wurden in Garching 48 Mietwohnungen für Institutsangehörige errichtet, die in den ersten beiden Monaten des Jahres 1967 bezogen werden konnten. Außerdem wurden 3 Familienheimdarlehen gewährt. Der weitere Ausbau der Wohnungsfürsorge ist für die Gewinnung und Erhaltung qualifizierter Mitarbeiter von besonderer Bedeutung.

T1	Torgebäude
D1, D1A, L1, W1; L2	Experimentelle Abteilung 1
L3, W2, L4, D3, L3M	" " 2
L5, L5E	" " 3
D2	Theoretische Abteilung
J1	Abteilung Technik
ZW + HO	Zentralwerkstatt + Zentrallager
EZ	Energiezentrale
HZ	Heizzentrale
F	Fahrbereitschaft
C	Kantine
Z	Zentralgebäude
A	Dienstwohnungen, Gästezimmer
X1, X2, X2A, X2B,	Max-Planck-Institut für
X2C, X4	Extraterrestrische Physik

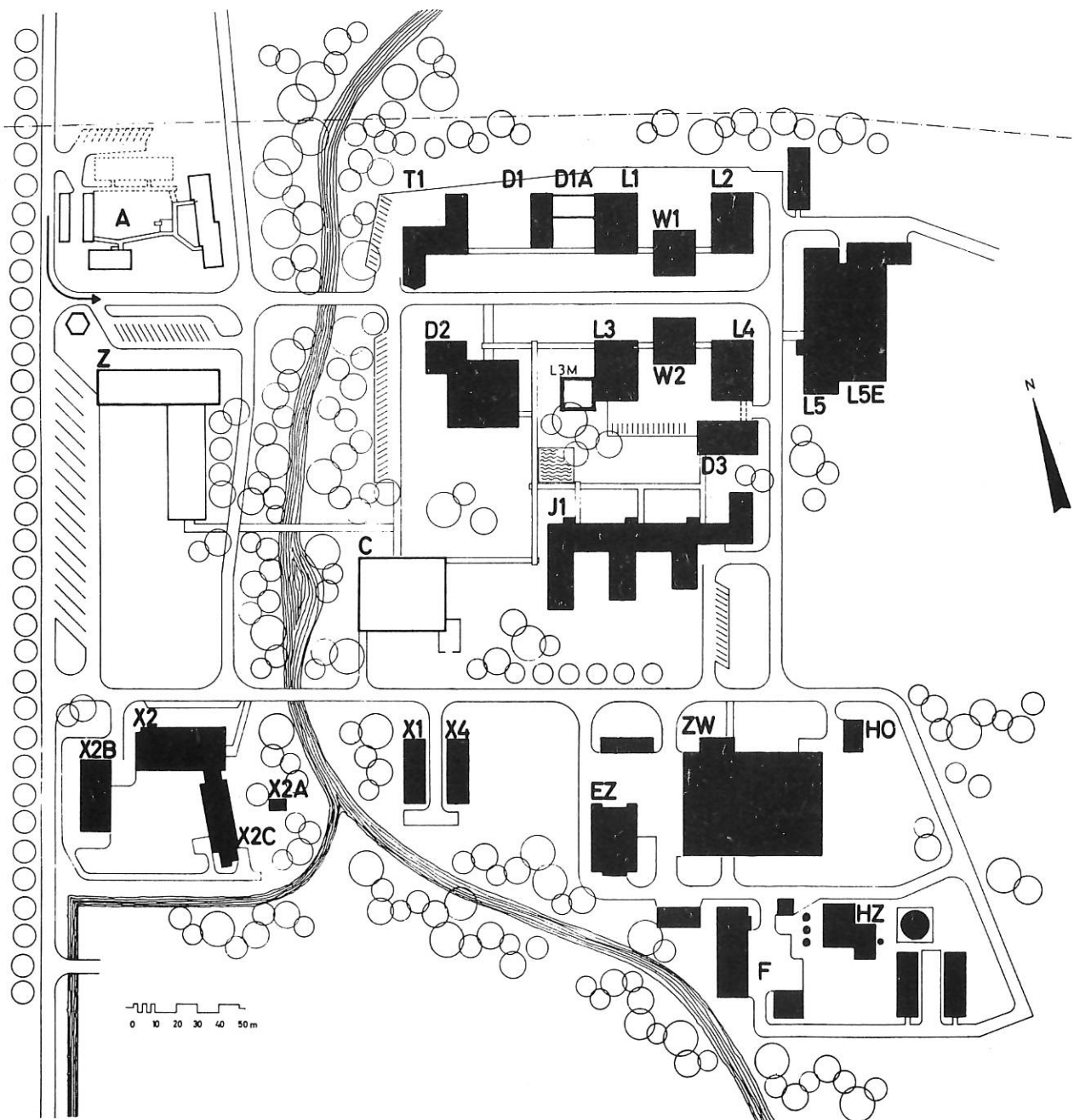


Abb. 33: Lageplan des Instituts für Plasmaphysik

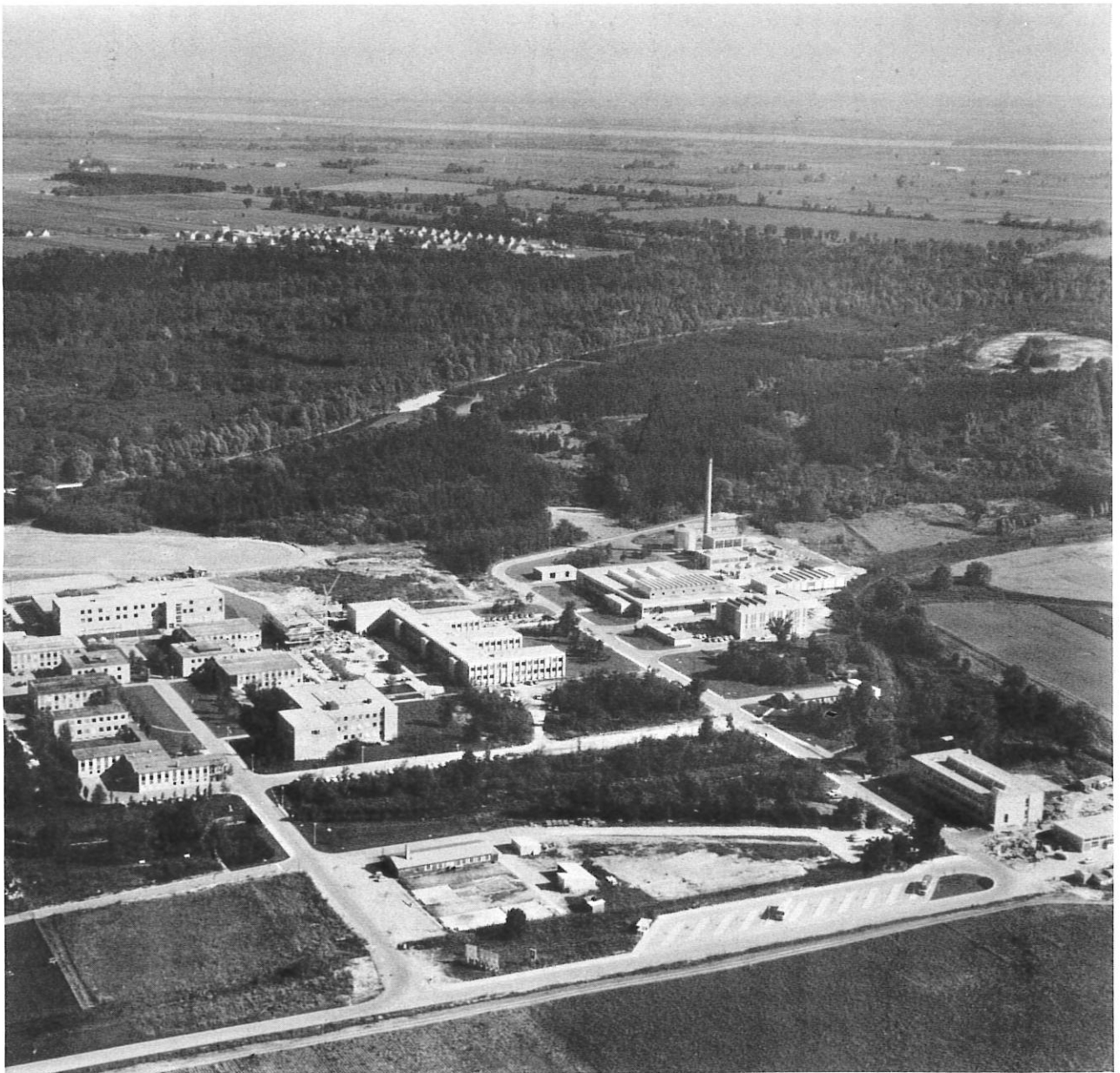


Abb. 34: Luftbild des Instituts für Plasmaphysik
(Luftbild: Bayerischer Flugdienst Hans Bertram,
München, Flughafen Riem; Freigabe Reg. v. Öbb.
Nr. G 4 / 17.868)

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK GMBH, MÜNCHEN-GARCHING

<p>Geschäftsführung: Dr. Ernst Felschow Dr. Günter Lehr</p>		<p>Wissenschaftliche Leitung: Vorsitzter und wissenschaftlicher Direktor: Prof. Dr. Arnulf Schüter</p>	
<p>Mitglieder: Prof. Dr. Ludwig Biermann, Prof. Dr. Ewald Fünfer, Dr. Gerhard von Gierke, Prof. Dr. Werner Heisenberg, Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter, Prof. Dr. Rudolf Wienecke</p>		<p>Mitglieder: Prof. Dr. Ludwig Biermann, Prof. Dr. Ewald Fünfer, Dr. Gerhard von Gierke, Prof. Dr. Werner Heisenberg, Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter, Prof. Dr. Rudolf Wienecke</p>	
<p><u>Exp. Plasmaphysik 1</u> (Gebäude D 1, L 1, W 1, L 2, B 1)</p>	<p><u>Exp. Plasmaphysik 2</u> (Gebäude L 3, W 2, L 4, D 3)</p>	<p><u>Exp. Plasmaphysik 3</u> (Gebäude L 5, L 5 E)</p>	<p><u>Theorie</u> (Gebäude D 2)</p>
<p>Direktor: Prof. Dr. Fünfer</p> <p>Erzeugung von Plasmen hoher Dichte und Temperatur durch schnelle Kompression</p> <p>a) lineare Konfigurationen (Theta-Pinch)</p> <p>b) toroidale Konfiguration (M + S und Hexapolefelder)</p> <p>Stabilität, Endverluste; Entwicklungs- und Verbesserung von Meßmethoden.</p>	<p>Direktor: Dr. von Gierke</p> <p>Toroidale Einschließung bei niedriger Dichte, Wechselwirkung Ionen-/Elektronen-Strahl mit einem Plasma, Wechselwirkung von Hochfrequenzfeldern mit einem Plasma; Untersuchungen von thermischen Plasmen; Caesium-Plasma, Manprobleme, Festkörperzerstörung, Ultrahochvakuumtechnik.</p>	<p>Direktor: Prof. Dr. Wienecke</p> <p>Stationäre Hochdruckplasmen, Stoßwellen, Plasmabeschleunigungen und HHD-Generatoren; Mikrowellen, Plasmaerzeugung durch Laserstrahlung.</p>	<p>Direktor: Prof. Dr. Schüter</p> <p>Mikroinstabilitäten, kinetische Gleichungen, Magnetohydrodynamik, Wellen und Schwingungen im Plasma, N-gnetfeldberechnungen, Auswertung von Meßergebnissen, Rechenanlage IBM 7090, Bibliothek, Dokumentation.</p>
<p><u>Verwaltung</u> (Gebäude I 1, D 2, I 1 u.a.) Leiter: A. Ilse</p> <p>Haushalt und Finanzen, Personalstelle, Beschaffungsstelle.</p>	<p><u>Allgemeine Dienste</u> (Gebäude I 1, D 2, F u.a.) Verantwortlicher Leiter: der Leiter der Verwaltung</p> <p>Bauverwaltung, Hausverwaltung, Waren- und Ausgang, Lagerverwaltung, Fahrernitschaft, Boten- und Fernsprechdienst, Bewachung, Wohnungsfürsorge, Kantineverwaltung.</p>	<p><u>Zentralwerkstatt</u> (Gebäude Z 1)</p> <p>Verantwortlicher Leiter: der Direktor der Abt. Technik</p> <p>Arbeitsvorbereitung, Mechanische Werkstatt, Feinmechanik, Schlosserei, Schweisserei, Kunststoffwerkstatt, Schreinerei, Elektrowerkstatt, Elektronikwerkstatt, Betriebswerkstatt, Betriebsingenieur.</p>	

Abb. 35: Organisatorische Struktur des Instituts für Plasmaphysik

3. Organisatorische und finanzielle Entwicklung

In der organisatorischen Struktur des Instituts (vgl. Abb. 35) haben sich auch in diesem Berichtsjahr keine Veränderungen ergeben. Die auf Initiative des Bundes zurückgehenden Verhandlungen über eine Beteiligung des Bundes und der Länder an der Gesellschaft sind noch nicht abgeschlossen.

Im Jahre 1966 wurden als Vertreter des Bundes die Herren Ministerialdirektor Dr. Pretsch und Ministerialdirigent Dr. Scheidwimmer neu in den Verwaltungsrat berufen. Im übrigen blieb die personelle Zusammensetzung der Gesellschaftsorgane und der Wissenschaftlichen Leitung unverändert.

Auf der Grundlage eines 2. Assoziationsvertrages für die Zeit vom 1.1.1965 bis 31.12.1967 wurde die bereits im Jahre 1961 begonnene Zusammenarbeit mit der Europäischen Atomgemeinschaft auch im Berichtsjahr erfolgreich fortgesetzt. Die Verbindung zu den übrigen Vertragspartnern von EURATOM wurde - insbesondere auf dem Wege über die Groupe de Liaison - weiter ausgebaut und vertieft.

Für die Finanzierung seiner Arbeiten standen dem Institut im Rechnungsjahr 1966 zur Verfügung:

Zuschüsse

des Bundesministers für wissenschaftliche Forschung	10.301.721,91 DM
der Länder	9.532.012,14 DM
der EURATOM	6.898.761,37 DM
eigene Einnahmen	1.585.768,31 DM
	<hr/>
	28.318.263,73 DM

Davon wurden verwendet für:

Personalausgaben	12.007.809,67 DM
Sachausgaben	2.671.835,56 DM
Allgemeine Ausgaben	3.203.965,73 DM
Einmalige Ausgaben	10.434.652,77 DM
	<hr/>
	28.318.263,73 DM

Von den Einmaligen Ausgaben entfallen auf
Bau- und Wohnbaumaßnahmen

4.616.508,69 DM

Die gesamte finanzielle Entwicklung seit der Gründung des Instituts ist aus Abb. 36 ersichtlich.

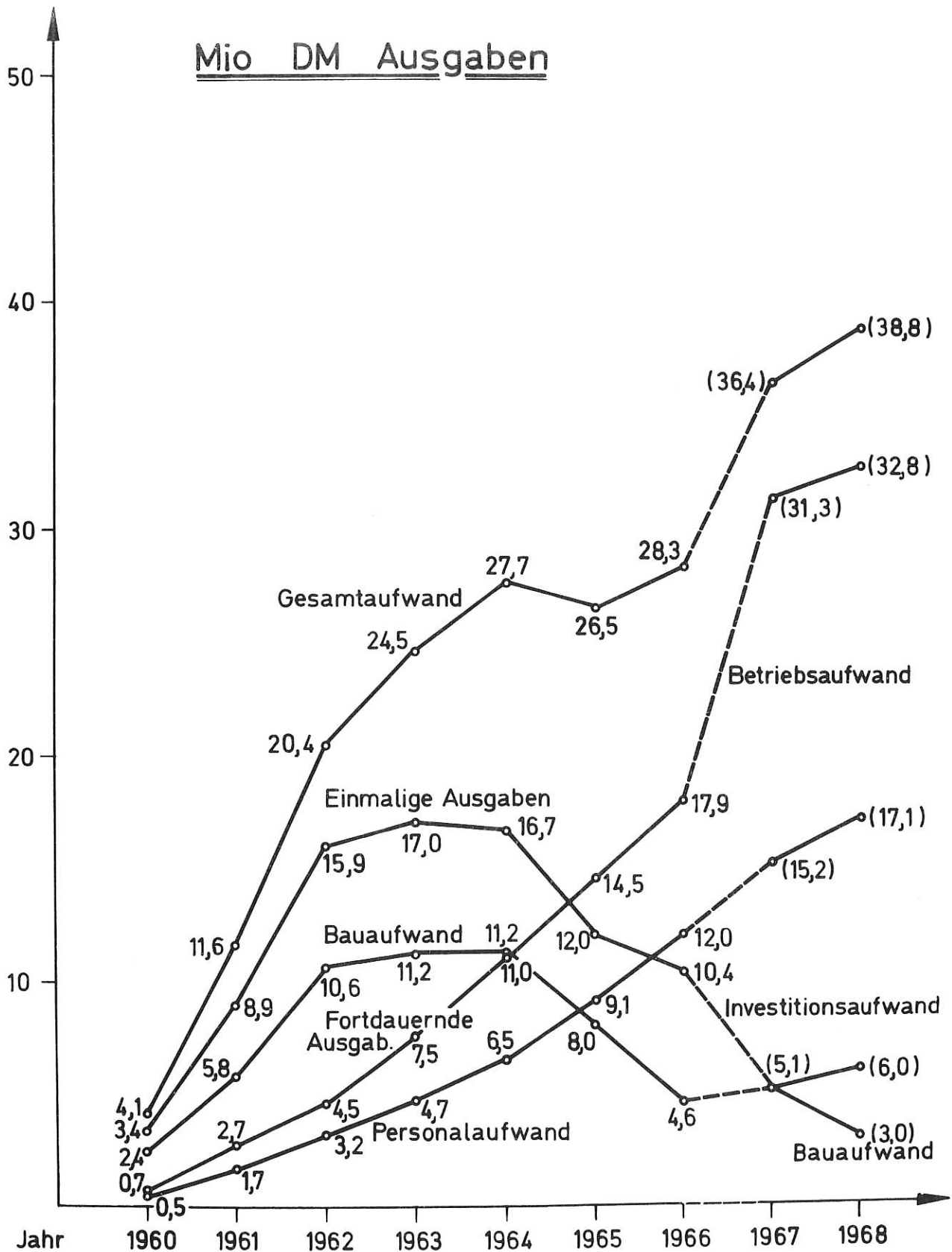


Abb. 36: Entwicklung der Ausgaben

Veröffentlichungen

- 1 B. Ahlborn, M. Salvat, "Calculation of Shock Front Parameters in a Plasma", Z.f. Naturforschg. (im Druck)
- 2 C. Andelfinger, R. Chodura, G. Decker, D. Düchs, E. Fünfer, A. Heiss, H. Hermansdorfer, M. Keilhacker, M. Ulrich, H. Zwicker, "Influence of Impurities on the Electron Temperature in a Theta-Pinch", Phys. Let. 20, 491 (1966)
- 3 C. Andelfinger, G. Decker, H. Hermansdorfer, M. Keilhacker, E. Remy, M. Ulrich, H. Wobig, G.H. Wolf, "Preliminary Investigation of a Corrugated θ -Pinch ("LIMPUS") at ISAR I", 1st European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 4 E. Berkl, D. Eckhardt, G. v. Gierke, G. Grieger, "Resistive Diffusion of Cesium Plasma in a Stellarator", Phys. Rev. Lett. 17, No. 17, 906 (1966) und Vortr. 1st European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 5 E. Berkl, G. Grieger, F.W. Hofmann, S. Miyoshi, "Messung der Erzeugungsrate einer Cesium-plasmaquelle im Magnetfeld", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, No. 5, 317 (1966)
- 6 M.J. Bernstein, "Eight Channel Polychromator to Measure Narrow Transient Spectral Profiles in the Ultraviolet", Applied Optics 5, 174 (1966)
- 7 F. Blau, E. Guillino, M. Hashmi, N. D'Angelo, "Effect of Ion-Neutral Collisions on the Ion Density in a Q-Machine", 1st European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 8 E.W. Blauth, "Dynamic Mass Spectrometers", Elsevier-Verlag, Amsterdam (1966)
- 9 A. Borer "Erzeugung von intensitätsmodulierten Ionenstrahlen mit dem Duoplasmatron" DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, No. 5, 316 (1966)
- 10 Z. Celinski, F.W. Fischer, "Effect of Electrode Size in MHD-Generators with Segmented Electrodes", AIAA Journal, Vol. 4, No. 3, 1966
- 11 R. Chodura, P. Igenbergs, "Numerical and Experimental Investigations on Collisionfree Compression of a Plasma with Anomalous Friction", 1st European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966 and Conf. on Turbulence and Collisionfree Shock Waves in Plasmas, Cleveland, Ohio, USA (November 1966)
- 12 G. Decker, D. Düchs, H. Herold, "Dynamics of a Plasma in a High Frequency Theta-Pinch Discharge", 1st European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 13 H.F. Döbele, R. Wienecke, S. Witkowski, "Messung der Druckerhöhung in einem Wasserstofflichtbogen bei überlagertem axialem Magnetfeld" Z.f. Naturforschg. 21a, 4, S. 390 (1966)
- 14 D. Düchs, H.R. Griem, "Computer Study of the Dynamic Phase of a Small Theta-Pinch" Phys. of Fluids 9, 1099 (1966)
- 15 A. Eberhagen, "Elektromagnetische Strahlung aus Plasmen hoher Temperatur und Dichte" Z.f. Angew. Physik 20, 244 (1966)

- 16 D. Eckhartt, G. v. Gierke, G. Grieger, "Comparison of Alkali Plasma Loss Rates in a Stellarator and in a Toroidal Device with Minimum Mean-B Properties," Proc. IAEA Conf. on Plasma Physics and Contr. Nucl. Fusion Res., Culham 1965, Vol. II, 719 (1966)
- 17 D. Eckhartt, M. Keilhacker, "Neue experimentelle Ergebnisse bei der Erforschung der physikalischen Grundlagen der steuerbaren thermonuklearen Fusion", Die Naturwissenschaften 53, H. 22, 571 (1966)
- 18 W. Engelhardt, W. Katsaros, "Eine hochauflösende piezoelektrische Drucksonde zur Messung an Stoßwellen", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, E 32 (1966)
- 19 W. Feneberg, "Transport Properties of a Fully Ionized Hydrogen Plasma in a Magnetic Field" Varenna Symp. on Theoretical Plasma Physics, 1966
- 20 W. Feneberg, "The Electrical Conductivity of a Partially Ionized Argon-Potassium Plasma in a Magnetic Field", Int. Symp. on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation, Salzburg, 1966
- 21 W. Feneberg, "Transporterscheinungen eines vollionisierten Plasmas im Magnetfeld" Dissertation, Universität München, Februar 1966
- 22 H. Fisser, "Numerical Solutions of the Magnetohydrodynamic Equations for One-Dimensional Theta-Pinch Geometry", 1st European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 23 K.H. Geissler, "Der Einfluß leitender Wände auf die Diffusion eines schwach ionisierten Plasmas im Magnetfeld", Dissertation, Universität München, 1966
- 24 H. Grawe, "Das Feld der Elektronenzyklotronwelle in einem zylindrischen Plasma" DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, 1966
- 25 D. Gross, "Orts- und zeitaufgelöste Infrarotstrahlung im Bereich der Plasmafrequenz eines Theta-Pinch Plasmas", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, F 38 (1966)
- 26 A. Heiss, "Methoden und Ergebnisse von Interferenzmessungen an Theta-Pinch Plasmen", Proc. ISL-Koll. über Hyperschallaerodynamik und Meßverfahren der Kurzzeitphysik in Saint Louis, 1966
- 27 W. Herrmann, "Untersuchungen am Elektronenstrahlplasma", Dissertation, TH München, 1966
- 28 W. Herrmann, "Untersuchungen am Elektronenstrahlplasma" Z.f. Naturforschg. 21a, 2033 (1966)
- 29 W. Herrmann, "Excitation of Electron Plasma Oscillations by the Interaction of an Ion Beam with a Plasma", 1st European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 30 H. Herrmansdorfer, "Messung hoher Elektronendichten mit einer neuartigen Mikrowellen-Reflexionssonde an einem linearen z-Pinch", Z.f. Naturforschg. 21a, 1471-1478 (1966)
- 31 F. Hertweck, "A Numerical Computation of the LIMPUS-Equilibrium", Varenna Symp. on Theoretical Plasma Physics, 1966
- 32 G. Hofmann, "Strahlungsvorionisierung von Wasserstoff", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, L 62 (1966)

- 33 J. Junker, "Experimentelle Untersuchungen zur Drift eines Plasmaringes im rein to-
toidalen Magnetfeld", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, F 36 (1966)
- 34 W.H. Kegel, "Radiation from a Plasma Stimulated by Two Short Microwave Pulses at
the Gyrofrequency and its Second Harmonic", 1st European Conf. on Contr. Fusion
and Plasma Physics, München 1966
- 35 B. Kronast, "Application of Ruby Laser for Local Measurement of Plasma Parameters"
Int. Quantum Electronics Conf., Phoenix, Arizona, USA, 1966
- 36 B. Kronast, "Experiments on Scattering Laser Light by Thermal Density Fluctuations
in a Plasma", Conf. on Scattering, Non-Linear Optics and Electro-Magneto Optics,
University of York, 1966
- 37 B. Kronast, H. Röhr, E. Glock, H. Zwicker, E. Fünfer, "Measurements of the Ion and
Electron Temperature in a Theta-Pinch Plasma by Forward Scattering", Phys. Rev. Lett. 16,
1082 (1966)
- 38 J. Lindner, D. Lortz, A. Schlüter, "Small Rotational Transforms" Varenna Symp. on
Theoretical Plasma Physics, 1966
- 39 D. Lortz, A. Schlüter, "Toroidal Low B Equilibrium and Magnetic Mapping", 1st European
Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 40 W. Lotz, F. Rau, E. Remy, G.H. Wolf, "Plasmaverluste in einem toroidalen Theta-
Pinch mit überlagertem Hexapolfeld", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, F 37 (1966)
- 41 W. Lotz, "Electron Impact Ionization Cross Sections and Ionization Rate Coefficients
for Atoms and Ions", Astrophys. J. Suppl, (im Druck)
- 42 W. Lotz, "Ionization Potentials of Atoms and Ions from Hydrogen to Zinc", J. Opt.
Soc. Am. (im Druck)
- 43 W. Lünow, M. Tutter, "Beugung elektromagnetischer Wellen an Plasmazylindern", DPG-
Tagung Kiel, Phys. Verh 5, 1966
- 44 W. Makios, "New Microwave Interferometric Device Using Lecher Wires for High Spatial
Resolution", The Review of Scientific Instruments (im Druck)
- 45 W. Makios, "Mikrowellenmessungen der Elektronendichte und -stoßfrequenz in elektroma-
gnetisch erzeugten Stoßwellen", Z.f. Naturforschg. (im Druck)
- 46 J. Mantel, "Definition of Jitter and a Fast Method to Derive it", Electronics
Letters, 2, Nr. 8, (1966)
- 47 P. Merkel, A. Schlüter, "Axisymmetric Magnetohydrostatic Equilibria without Longi-
tudinal Currents", Varenna Symp. on Theoretical Plasma Physics, 1966
- 48 G. Müller, G. Landauer, "Radiation of Harmonics $n\omega_e$ and $1/2 n\omega_e$ from a Beam-
Generated Plasma", 1st European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 49 G. Müller, G. Landauer, "Radiation of Harmonics $n\omega_e$ and $1/2 n\omega_e$ from a Beam-
Generated Plasma", Phys. Lett. 23, No. 9, 555 (1966)

- 50 B. O'Brien, "Slow Wave Transmission Modes of an Isotropic Inhomogeneous Cylindrical Hot Plasma", Plasma Physics Accelerator Thermonuclear Research (im Druck)
- 51 B. O'Brien, "A Phase-Coherent Pseudo-Superheterodyne Receiver", Journal of Applied Physics (im Druck)
- 52 W. Ott, "Untersuchung der Cäsium-Plasma-Diode mit einer neuen Elektronenstrahlsonden-Technik", Dissertation, TH München, 1966
- 53 W. Ott, "Verteilung der elektrischen Feldstärke in einer Cäsium-Plasma-Diode" DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 6, No. 5, 317 (1966)
- 54 G. Peter, "Die Hochfrequenz-Resonanz-Sonde", Dissertation, Universität München, 1966
- 55 E. Remy, "Untersuchung von Hoch- β -Plasmen in toroidalen Magnetfeldern", Z.f. Naturforschg. 21a, 1090 (1966)
- 56 H. Röhr, "Laser als Instrument der Plasmadiagnostik", Proc. ISL-Koll. über Hyper-schallaerodynamik und Meßverfahren der Kurzzeitphysik in Saint Louis, 1966
- 57 R. Saison, H.K. Wimmel, "Über Minimum-B-Stabilisierung der universellen Instabilität", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, (1966)
- 58 R. Saison, H.K. Wimmel, "On Minimum-B-Stabilization of Electrostatic Drift Instabilities", 1st European Conf. on Contrl. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 59 A. Salat, "Nonlinear Incoherent Light Scattering from Plasmas", Varenna Symp. on Theoretical Plasma Physics, 1966
- 60 A. Salat, "Mikroskopische Plasmabeschreibung und Anwendung auf nichtlineare inkohärente Lichtstreuung", Dissertation, Universität München, 1966
- 61 A. Schlüter, "Low β Toroidal Equilibria", Varenna Symp. on Theoretical Plasma Physics, 1966
- 62 A. Schlüter, "Zur Dynamik eines toroidalen Theta-Pinches", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, 1966
- 63 A. Schlüter, "Toroidale Einschließung von Plasmen", Vortrag Physiker-Tagung München, Phys. Verh. 6, 1966
- 64 P.P.J.M. Schram, H. Tasso, "Persistence of MHD Stability in Theory Including Hall-Term", 1st European Conf. on Contr..Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 65 U. Schumacher, R. Wilhelm, "Ein schneller 120 kV z-Pinch zur Vorionisierung bei geringen Ausgangsdichten", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 5, L 16 (1966)
- 66 H. Tasso, P.P.J.M. Schram, "Qualitative Stabilizing and Destabilizing Effects in the Macroscopic Theory", Varenna Symp. on Theoretical Plasma Physics, 1966
- 67 O. Theimer, "High Density Corrections to the Scattering Cross Section of a Plasma", Phys. Let. 20, 639 (1966)

- 68 O. Theimer, H. Röhr, B. Kronast, "Investigation of Collisionless Heating Processes by Means of Laser Scattering", 1st European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, München 1966
- 69 M. Troppmann, "Verzerrung der Elektronen-Energieverteilung in einer elektrostatisch eingeschnürten Entladung", DPG-Tagung Kiel, Phys. Verh. 6, No. 5, 325 (1966)
- 70 H. Vernickel, "Influence of Surface Defects on Sputtering", Z.f. Naturforschg. 21a, 1308 (1966)
- 71 K. Weinhardt, "Untersuchung über die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in einem zylindrischen Plasma mit Magnetfeld", Dissertation, TH München, 1966
- 72 H.K. Wimmel, R. Saison, "On Minimum-B Stabilization of Electrostatic Drift Instabilities" Z. Naturforschung 21a, 1953 - 1959 (1966).
- 73 H.K. Wimmel, R. Saison, "Minimum-B Resistant Low-Frequency Plasma Instabilities", Physics Letters 23, 449-450 (1966).

Laborberichte

- IPP 1/43 G. Hofmann, "Strahlungsvorionisierung von Wasserstoff"
- IPP 1/44 W. Lotz, F. Rau, E. Remy, H. Wobig, G.H. Wolf, "Plasma Losses in a Toroidal Theta Pinch with Superimposed Hexapole"
- IPP 1/45 H. Finkelmeyer, W. Lotz, "Berechnungen zum Thetapinch-Experiment mit überlagertem Hexapol"
- IPP 1/46 W. Katsaros, "Entwicklung und Erprobung einer hochauflösenden piezoelektrischen Drucksonde"
- IPP 1/47 W. Lotz, "Electron Impact Ionization Cross Sections and Ionization Rate Coefficients for Atoms and Ions"
- IPP 1/48 O. Theimer, "Lichtstreuung und Driftinstabilität in einem Plasma"
- IPP 1/49 W. Lotz, "Ionisierungsenergien für Atome und Ionen von H bis Ni ($Z = 28$)"
- IPP 1/50 W. Lotz, "Eine empirische Formel für den Ionisierungsquerschnitt gegenüber Elektronenstoß"
- IPP 1/51 G. Decker, "Plasmadynamik bei hochfrequenten Theta-Pinch Entladungen"
- IPP 1/52 W. Engelhardt, "Stoßwellenexperimente am Antipinch"
- IPP 1/53 J. Junker, "Untersuchungen zur Drift eines Plasmaringes im toroidalen Magnetfeld"
- IPP 1/54 W. Lotz, "Binding Energies of the Next Inner Subshell of Atoms and Ions from B to Zn"
- IPP 1/55 C. Andelfinger, G. Decker, E. Fünfer, H. Hermansdorfer, M. Keilhacker, E. Remy, M. Ulrich, H. Wobig, G.H. Wolf, "Vorläufige Untersuchung eines gewellten Theta-Pinches ("Limpus") an der Batterie ISAR I"
- IPP 2/46 G. Grieger, "Effects Related to the Radial Electric Field in a Q-Machine"
- IPP 2/47 G. Grieger, "On the Ionization of Barium on Hot Rhenium Surfaces"
- IPP 2/48 W. Ott, "Untersuchung der Cs-Plasma-Diode mit einer neuen Elektronenstrahlsonden-Technik"
- IPP 2/49 M. Michaelis, "Interferometer für drei Wellenlängen: 2,5 mm, 4 mm und 8 mm"
- IPP 2/50 K.H. Geissler, "Measurements of the Diffusion Rate of a Weakly Ionized Plasma Transverse to a Magnetic Field"
- IPP 2/51 K.H. Geissler, "Investigation of the Diffusive Decay of a Plasma Contained in a Conducting Cylinder in the Presence of a Magnetic Field"

- IPP 2/52 D. Eckhartt, "Review of Munich Alkali Plasma Experiments in Toroidal Devices"
D. Eckhartt, G. v. Gierke, G. Grieger, "Cesium Plasma in the Stellarator
Wendelstein W1b"
- IPP 2/53 G. Landauer, G. Müller, "Radiation of Harmonics $n\omega_e$ and $n(\omega_e/2)$ from a Beam-
3/46 Generated Plasma"
- IPP 2/54 G. Peter, "Die Hochfrequenz-Resonanz-Sonde"
- IPP 3/35 W. Makios, "Mikrowelleninterferometrie an elektromagnetisch erzeugten Stoß-
wellen"
- IPP 3/36 H. Salzmann, "Anfärbemethoden zur Messung der örtlichen hydrodynamischen
Plasmageschwindigkeit"
- IPP 3/37 W. Ohlendorf, "Leistung eines MHD-Generators unter Berücksichtigung von Hall-
Effekt und Ionenschlupf"
- IPP 3/38 M. Salvat, "Der innere Potentialabfall in MHD-Generatoren"
- IPP 3/39 L.L. Lengyel, "Analytische Untersuchung des Innenwiderstandes von MHD-
Generatoren"
- IPP 3/40 G. Brederlow, M. Salvat, "Anlage zum Betrieb eines MHD-Generators mit einem
Gaskreislauf und der Einrichtung für Stromdichtemessungen"
- IPP 3/41 F.W. Fischer, "Experimentelle Untersuchungen der Stromdichteverteilung in
einem magnetohydrodynamischen Generator mit segmentierten Elektroden"
- IPP 3/42 R. Schwenn, "Messungen von elektrischer Leitfähigkeit und Elektronentemperatur
in einem Argon-Kalium-Plasma bei verschiedenen Gastemperaturen"
- IPP 3/43 H. Nett, "Bau einer Membranstoßrohranlage für Plasmaexperimente und Bestimmung
der Plasmaparameter hinter der primären Stoßfront"
- IPP 3/44 C. Mahn, H. Ringler, G. Zankl, "Experimentelle Untersuchungen an einem Wasser-
stoff-Lichtbogen im achsenparallelen Magnetfeld"
- IPP 3/45 H. Klingenberg, H. Muntenbruch, "Experimente zur Untersuchung von Wechsel-
wirkungen zwischen Stoßwellen und stationären Magnetfeldern"
- IPP 3/46 G. Landauer, G. Müller, "Radiation of Harmonics $n\omega_e$ and $n\frac{\omega_e}{2}$ from a Beam-
2/53 Generated Plasma"
- IPP 3/47 P.H. Grassmann, "Der Druckaufbau in einem stationären, magnetfeldstabilisierten
Heliumplasma hoher Dichte und Temperatur"
- IPP 3/48 O. Klüber, "Untersuchung des Druckaufbaus einer stationären, magnetfeld-
stabilisierten Helium-Entladung mit Hilfe magnetischer Messungen"
- IPP 3/49 L.L. Lengyel, "Die Verminderung der Spannungen und Ströme durch die endliche
Segmentierung in Faraday- und Hall-Generatoren"
- IPP 3/50 L.L. Lengyel, "Strom- und elektrostatische Potentialverteilungen in MHD-
Generatoren"

- IPP 4/26 K.H. Fertl, G. Herppich, A. Knobloch, H. Schlageter, "New Fast Capacitor Banks for Theta-Pinch-Experiments at the Institut für Plasmaphysik in Garching"
- IPP 4/28 H. Häglsperger, R.-C. Kunze, G. Müller, "Combined Start and Crowbar Sparkgap of Wide Operating Range"
- IPP 4/29 G. Herppich, A. Knobloch, "An Analog System for the Design of Switched Discharge Circuits in Plasma Physics"
- IPP 4/30 A. Knobloch, J. Mantel, G. Roos, H. Schlageter, F. Werner, "Geometric High-Frequency Models and Potential Analogs for the Determination of Current and Field Distributions"
- IPP 4/31 P. Krüger, B. Oswald, "Homogeneity Investigations of Superconducting Wires and Cables"
- IPP 4/32 R.C. Kunze, E.v.Mark, H. Wedler, "Ferrite Decoupled Crowbar Sparkgap"
- IPP 4/34 K. Maischberger, "A Giant Pulse Laser with a Triggerable Passive Q-Switch Performance"
- IPP 4/36 F. Skerjanc, "Logarithmic DC-Amplifier with Earth-Isolated Input"
- IPP 4/37 J.E. Gruber, "Transient Voltage Decoupling Elements"
- IPP 4/49 R. Klockenkämper, "Untersuchungen zur Modenselektion und Impulsverstärkung in Rubinlasern"
- IPP 6/47 R. Gorenflo, M. Pacco, "Einige Testmethoden für Zufallsgeneratoren"
- IPP 6/48 P. Merkel, A. Schlüter, "Axialsymmetrische magnetohydrostatische Gleichgewichte"
- IPP 6/49 A. Salat, "Mikroskopische Plasmabeschreibung und nichtlineare inkohärente Lichtstreuung"
- IPP 6/50 J. Nührenberg, "Spezielle magnetohydrostatische axialsymmetrische meridionale Gleichgewichte"
- IPP 6/51 W. Feneberg, "Electrical conductivity of a partially ionized plasma in a magnetic field"
- IPP 6/52 D. Hilsenbeck, "Verbreitung von Forschungsergebnissen mit Hilfe von Datenverarbeitungsanlagen im Institut für Plasmaphysik, Garching bei München"
- IPP 6/53 H. Wobig, "Gleichgewicht und Stabilität eines Plasmas mit Oberflächenströmen"

This report is to be treated as strictly confidential.

The 'Institut für Plasmaphysik' holds the exclusive rights of publication, mimeographing, propagation and translation into foreign languages of the original text, inclusive of the drawings, wholly or partially; also of excerpts or résumés, as well as of the technical or scientific contents of this report. Exceptions to these restrictions require written permission.

Furthermore, the 'Institut für Plasmaphysik' reserves the right of exclusive exploitation of the information contained in this report, for the purpose of obtaining protective industrial rights, particularly patent and utility patent rights at home and abroad. Actions of exploitation taken on the basis of the knowledge gained from this report cannot be regarded as grounds for obtaining the right of prior use ('Vorbenutzungsrecht') according to article 7 paragraph 1, first sentence of the German Patent Law. The reader is referred to article 5 of the Patent Law. For reasons stipulated by the Patent Law, the report must not be exhibited in public libraries, or lent out indiscriminately.

The Institute does not guarantee that the information given in this report is free from protective rights, such as patent rights, utility patent rights or trade-mark rights.

No guarantee is given in respect of the accuracy, completeness or usefulness of the information contained in this report. Thus, no liability can be accepted for damage resulting from use of the information, or of the apparatus, methods and procedures described.

