

2 DIE FRÜHEN JAHRE

Pinche und Co.

ISABELLA MILCH

Erste Untersuchungen mit dem Ziel, die Kernverschmelzung zur Energiegewinnung nutzbar zu machen, begannen Ende der 1940er Jahre, vor allem in den USA, Russland und Großbritannien. Die Aufgabe: ein Wasserstoff-Plasma mit magnetischen Feldern stabil und wärmeisolierend einzuschließen, um es auf Zündtemperatur von über 100 Millionen Grad aufheizen zu können. Die ursprüngliche Hoffnung auf einen schnellen Durchbruch musste bald aufgegeben werden. Nach zehn Jahren Forschungsarbeit hatte sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass zur Entwicklung der Fusion ein Langzeitprogramm mit intensiver Grundlagenforschung nötig sei.

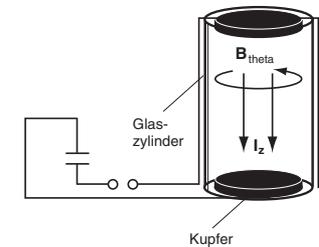
In diesem Stadium der Entwicklung begannen in Deutschland Überlegungen zu einer Ausweitung der Fusionsforschung. Am 28. Juni 1960 wurde das IPP als „Institut für Plasmaphysik GmbH“ gegründet. 1971 wurde es als Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in die Max-Planck-Gesellschaft eingegliedert. Zur Gründungszeit war noch völlig offen, auf welchem Weg das gesteckte Ziel am besten zu erreichen sei. Die theoretischen und experimentellen Arbeiten des IPP waren daher in den Anfangsjahren so breit wie möglich angelegt: Man studierte das Verhalten des Plasmas sowohl in stromstarken Bogenentladungen als auch mit den verschiedensten Methoden magnetischen Plasmaeinschlusses in geradlinigen Anordnungen – zum Beispiel Spiegelmaschinen und Pinche – und ringförmigen Anlagen wie Stellaratoren.

In diesem bunten Zoo der Anlagentypen konnten zunächst allein die Pinche ein heißes Plasma von mehreren Millionen Grad liefern:

Pinche (engl. „to pinch“, zusammenquetschen) heizen das Plasma durch schnelle magnetische Kompression. Das einschließende Magnetfeld ist während der Entladung nicht konstant, sondern steigt zu Beginn schnell – in etwa einer Millionstel Sekunde – an. Dabei wird das Plasma zusammengedrückt und stark aufgeheizt, jedoch nur für wenige Millionstel Sekunden eingeschlossen¹.

Anlagen vom Typ Stellarator (lat. „stella“, Stern) dagegen – neben den Pinchen der zweite Arbeitsschwerpunkt in den Anfangsjahren des IPP – schließen das Plasma durch statische Magnetfelder ein. In den ersten IPP-Stellaratoren wurden diese Felder durch ebene Spulen hergestellt, die über das Plasmagefäß gefädelt waren sowie durch spiralförmige Spulen, die direkt auf das Gefäß aufgewickelt wurden. Beide zusammen erzeugen verdrehte Magnetfeldlinien, welche die zum Plasmaeinschluss nötigen ineinander liegenden magnetischen Flächen aufspannen. Ist eine stabile Gleichgewichtslage des Plasmas gefunden, bleibt es im Prinzip so lange eingeschlossen, wie Strom in den Magnetspulen fließt. Aufgeheizt wurden die Plasmen zunächst durch Kontakt mit heißen Metallflächen, wobei Temperaturen von 2000 Grad kaum überschritten werden konnten.

Während das Verhältnis von Plasma- zu Magnetfelddruck – genannt Beta – bei Stellaratoren niedrige Werte von wenigen Prozent besitzt, können Pinche Plasmen sehr hoher Energiedichte und damit auch sehr hohe Beta-Werte erreichen. Für ein Kraftwerk bringen hohe Beta-Werte wirtschaftliche Vorteile, da ein niedrigeres Magnetfeld große Kostenersparnis mit sich bringt.



▲ Abb. 1

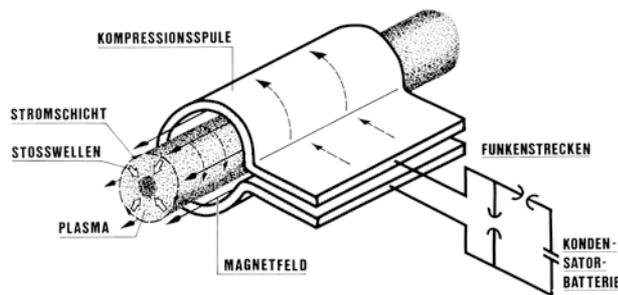
Abb. 1: Prinzip eines Z-Pinch.

Abb. 2: Prinzip eines Theta-Pinch.

Abb. 3: Der große lineare Theta-Pinch ISAR I erzeugte kurzzeitig Plasmatemperaturen von mehr als 50 Millionen Grad.

: Z-Pinch

Ziemlich klein waren die linearen Z-Pinche der ersten IPP-Jahre: In diesen Anlagen erzeugt ein parallel zur Längsachse des Plasmagefäßes – in z-Richtung – fließender, schnell ansteigender Strom das komprimierende Magnetfeld (Abb. 1). Ihr Plasmaeinschluss erwies sich als hochgradig instabil. Die Z-Pinche wurden hauptsächlich zur Erprobung neuer Messverfahren eingesetzt, aber auch zur Untersuchung von Plasma-Instabilitäten, die an den einfachen, für Messgeräte leicht zugänglichen Anlagen besonders gut zu analysieren waren: Heutige Lehrbuch-Beispiele wie Würstchen- oder Kink-Instabilität wurden hier erstmals beobachtet.



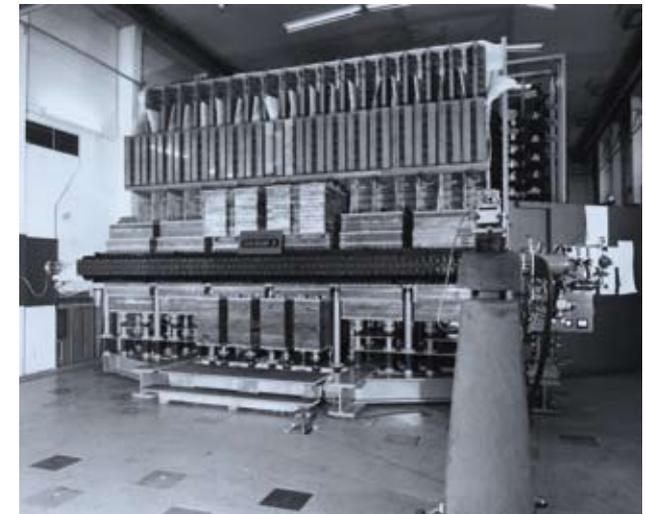
▲ Abb. 2

: Linearer Theta-Pinch

Schnell kamen lineare Theta-Pinche mit deutlich stabilerem Plasmaeinschluss hinzu: Der das komprimierende Magnetfeld erzeugende Strom fließt hier in einer einwindigen Spule um die Plasmasäule herum – in Richtung des Drehwinkels Theta (Abb. 2). Der Strom von vielen Millionen Ampere wird aus einer Kondensatorbatterie gespeist, die auf hohe Spannung aufgeladen und über schnelle Schalter über die Spule entladen wird. Eine der großen technologischen Herausforderungen dabei war es, hohe Ströme bei hohen Spannungen sehr schnell ansteigen zu lassen.

Innerhalb der Spule befindet sich in einem Quarzgefäß ein verdünntes Gas, das durch eine Vorentladung bereits mäßig heiß und leitend gemacht wird. Das schnell ansteigende Magnetfeld induziert in diesem Ausgangsplasma einen Strom, der das Plasmaintere gegenüber dem ansteigenden Strom abschirmt und zusammen mit dem Magnetfeld eine Kraft erzeugt, die das Plasma in das Zentrum des zylindrischen Rohres drückt. Bei dieser Kompression erreichen die Teilchen hohe Geschwindigkeiten von mehr als 1000 Kilometern pro Sekunde. Beim Zusammenprall des Plasmas auf der Rohrachse verwandelt sich diese Bewegungsenergie in Wärme – das Plasma wird so heiß, dass Fusionsreaktionen stattfinden.

Nach kleineren Vorgängern ging 1965 der große lineare Theta-Pinch ISAR I in Betrieb^{2,3}. Das 1,20 Meter lange Quarzgefäß für das Plasma besaß einen Durchmesser von 10 Zentimetern und wurde von einer 1,50 Meter langen Spule umschlossen (Abb. 3).



▲ Abb. 3

Gespeist wurde die Spule von einem schnellen Energiespeicher, einer 2,6 Megajoule-Batterie aus 2500 einzelnen Kondensatoren.

Durch Vorionisierung mit einem schnellen Stromstoß entlang der Achse des Entladungsgefäßes – wie im Z-Pinch – gelang es, Plasmen relativ geringer Dichte und hoher Reinheit zu erzeugen. Sie wurden anschließend durch das Theta-Pinch-Feld weiter komprimiert: In dem Deuterium-Plasma wurden Ionentemperaturen über 50 Millionen Grad gemessen sowie $2 \cdot 10^{10}$ Fusionsneutronen produziert. Allerdings begrenzten Plasmaverluste an den Enden des geradlinigen Entladungsgefäßes die Einschlusszeit auf sehr kurze 10 Mikrosekunden⁴.

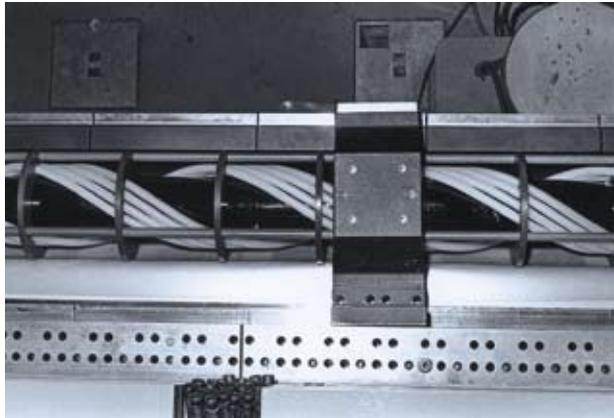
Abb. 4: Lineare Vorversuche an ISAR I für einen Hoch-Beta-Stellarator. Das geradlinige Plasmagefäß wurde mit schraubenförmigen Magnetwicklungen versehen.

Abb. 5: Prinzip eines Hoch-Beta-Stellarators.

Abb. 6: Der toroidale Theta-Pinch ISAR T1, ein Hoch-Beta-Stellarator: Durch den inneren Ring aus 48 Spulensegmenten, in dem das kreisförmige Plasmagefäß liegt, wird radial von außen – von der Kondensatorbatterie im Hintergrund – kurzzeitig ein starker Strom von 20 Millionen Ampere geschickt. Das schnell ansteigende Magnetfeld schiebt den Plasm Schlauch innerhalb von Bruchteilen einer Millionstel Sekunde zusammen und heizt ihn auf.

Abb. 7: Zur Wandstabilisierung muss das Vakuumgefäß eines Hoch-Beta-Stellarators der verschrauben Form des Plasmas folgen. In Vorbereitung von HBS II wurde im IPP ein solches Gefäß hergestellt. Das durch eine Flamme gezogene Quarzrohr wird erweicht und durch eine mechanische Vorrichtung geformt. Das Gefäß wurde 1975 zusammen mit einer entsprechend geformten Spule in ISAR T1-B erfolgreich eingesetzt.

Abb. 8: Auf das neue Gefäß aus getöntem Quarzglas werden hier die Stellarator-Magnetwicklungen aufgebracht.

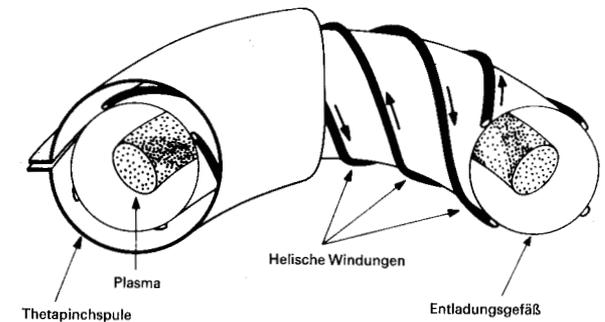


▲ Abb. 4

: Toroidaler Theta-Pinch

Dieses Grundübel linearer Pinche – die offenen Enden, an denen das Plasma verloren ging – lies sich nur in ringförmig geschlossenen Anlagen umgehen. 1968 beschloss man daher, den Schwerpunkt künftig auf toroidale Experimente zu legen, von denen bereits einige kleinere Anlagen betrieben worden waren. Es begannen Vorbereitungen, den großen linearen Theta-Pinch ISAR I ringförmig umzubauen⁵ (Abb. 4).

Ein Theta-Pinch-Feld allein kann in einer toroidalen Konfiguration jedoch kein Gleichgewicht zwischen Plasma und einschließendem Magnetfeld erzeugen. Wird aber – wie im Stellarator – zusätzlich ein helikales Feld überlagert, so sollten der Theorie nach stabile Gleichgewichte möglich werden: Es entsteht ein so genannter Hoch-Beta-Stellarator (HBS) (Abb. 5). Von einem



▲ Abb. 5

einfachen, zum Ring gebogenen Theta-Pinch weicht die HBS-Anordnung deutlich ab: Wegen des helikalen Feldes ist die Plasmasäule schraubenförmig verdreht, zugleich ist ihr Querschnitt elliptisch verformt – eine einzelne Magnetfeldlinie läuft in einer komplizierten Bahn um das Plasma herum.

: Programm-Erweiterung

Die Ergebnisse der ersten zehn IPP-Jahre bilanziert der Jahresbericht 1970: Es war einerseits gelungen, in den linearen Pinchen ein dichtes Plasma – allerdings sehr kurzzeitig – nahezu auf Fusionstemperatur zu bringen, andererseits in den ringförmigen Stellaratoren ein – zwar relativ dünnes und kaltes – Plasma für einige Zeit im Gleichgewicht zu halten. Nun wollte man „auf dem langen Weg zur wirtschaftlichen Nutzung der Kernverschmel-



▲ Abb. 6

zung den nächsten Schritt (...) versuchen, nämlich beide Forderungen gleichzeitig (...) erfüllen, also ein Plasma, das heiß und dicht genug ist, in etwa so lange einzuschließen, wie in einem Fusionsreaktor erforderlich wäre“.

In Fortführung des bisherigen Programmes bedeutete dies, einerseits die magnetische Kompression eines Plasmas in einer ringförmigen Pinch-Anordnung zu untersuchen, sowie andererseits die Stellaratorexperimente zu höheren Temperaturen und Dichten auszudehnen. Es begannen die Vorbereitungen für den großen Stellarator Wendelstein 7-A; Ende 1971 ging nach einjähriger Umbauzeit zudem der Hoch-Beta-Stellarator ISAR T1 in Betrieb (Abb. 6). Mit einem Durchmesser von 2,70 Metern war er der seinerzeit größte Torus für Hoch-Beta-Experimente weltweit.



▲ Abb. 7

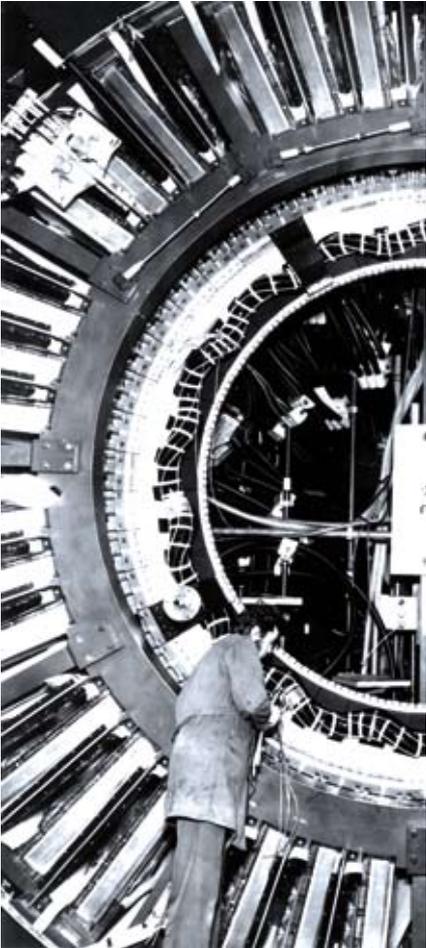
Ein Gleichgewicht in ringförmiger Konfiguration lässt sich auch ohne helikale Spulen, d.h. mit weniger komplizierten Feldern erreichen – wenn man nämlich im Plasmaring einen Strom induziert. Diese Anlagen sind axialsymmetrisch und arbeiten in Pulsen. Das Feld des induzierten Stromes und die von außen erzeugten Felder überlagern sich zu den gewünschten, schraubenartig um das Plasma herumlaufenden Kraftlinien. Steigen die Magnetfelder wie beim Theta-Pinch sehr rasch an und heizen das Plasma durch Stoßwellen und adiabatische Kompression auf, bezeichnet man die Betriebsart als „Screw-Pinch“ (engl. „screw“, Schraube). Er lässt sich als Überlagerung eines toroidalen Theta-Pinches und eines toroidalen Z-Pinches verstehen (Abb. 10). Voruntersuchungen zur Stabilität waren bereits an kleineren Anlagen gelaufen, zum Beispiel am linearen Screw-Pinch ISAR III.

Bleiben die magnetischen Einschlussfelder dagegen statisch, dann handelt es sich um einen Tokamak – eine Konfiguration, die 1969 in Russland sensationell gute Ergebnisse erzielt hatte. 1970 wurde daher beschlossen, das Spektrum der toroidalen IPP-Anlagen um ein axialsymmetrisches Niedrig-Beta-Experiment vom Tokamak-Typ zu ergänzen (siehe Kapitel 5). Die erste Tokamak-Anlage, Pulsator, ging Anfang 1972 in Betrieb.

Begleitet von zahlreichen kleineren Satellitenexperimenten konzentrierte sich die weitere Arbeit nun auf diese vier Anlagen: den Hoch-Beta-Stellarator ISAR T1, den Niedrig-Beta-Stellarator Wendelstein 7-A, den Screw-Pinch ISAR IV und den Tokamak Pulsator.



▲ Abb. 8



: Hoch-Beta-Stellarator

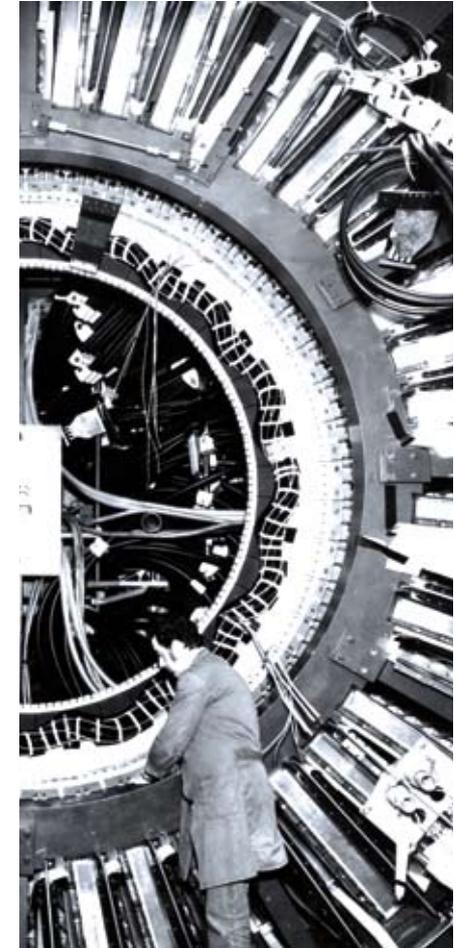
In Zusammenarbeit mit der Theorie sollte an ISAR T1 durch Kombination verschiedener helikaler Felder zunächst ermittelt werden, ob und wie lange Gleichgewicht und Stabilität erreicht werden können. Es gelang bald, die toroidale Drift des Plasmas nach außen zu beseitigen. Erstmals konnte mit ISAR T1 ein Plasma in einer Hoch-Beta-Stellaratorkonfiguration im vollständigen Torus im Gleichgewicht gehalten werden⁶. Die starke Kompression des Plasmas – verursacht durch die langen Anstiegszeiten der Batterie – führte jedoch zu unüberwindlichen Instabilitäten⁷.

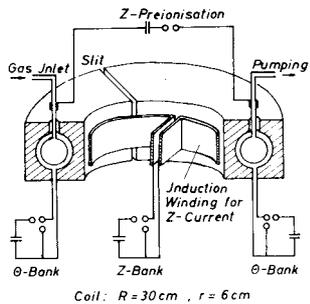
Experiment und Theorie sprachen für größere Anlagen, in denen das Stabilitätsproblem besser beherrschbar sein sollte. 1973 wurde daher ein neues Projekt konzipiert: Der deutlich größere HBS II mit 16 Metern Torusdurchmesser sollte die Stabilität der Hoch-Beta-Stellaratoren endgültig zeigen. Das Plasma sollte nur schwach komprimiert werden, um der stabilisierenden leitenden Wand nahe bleiben zu können (Abb. 7, 8, 9). Der Aufbau verzögerte sich jedoch zunächst durch die Unsicherheiten bei der Standortsuche für das große europäische Tokamakexperiment JET. Angesichts von Personalmangel und der inzwischen starken Konkurrenz von Tokamak und Stellarator wurde die HBS-Linie schließlich 1980 aufgegeben.

: Screw- und Belt-Pinch

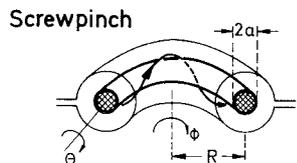
Zweiter Schwerpunkt der Hoch-Beta-Linie im IPP war der Screw-Pinch, eine ebenfalls kreisförmige, jedoch – im Unterschied zum schlanken, asymmetrischen HBS – gedrungene und rotationssymmetrische Konfiguration. Das in einem ringförmigen Plasma auftretende Gleichgewichtsproblem, eine radial nach außen wirkende Driftkraft, wurde im Screw-Pinch – wie beim Tokamak – aufgefangen durch Induktion eines toroidalen Plasmastroms und ein passendes vertikales Feld (Abb. 10). Der ab 1969 betriebene kleine Screw-Pinch ISAR IV (Torusdurchmesser: 60 Zentimeter) (Abb. 11) erreichte zwar ein Gleichgewicht, war jedoch hochgradig instabil.

Erst mit Übergang von einem kreisförmigen zu einem langgestreckten Plasmaquerschnitt verbesserte sich die Stabilität bei hohem Beta⁸. Der Plasmaquerschnitt hatte in etwa die Form eines Gürtels – daher auch der englische Name „Belt-Pinch“ (Abb. 12). In zunehmend größeren Ausbau-

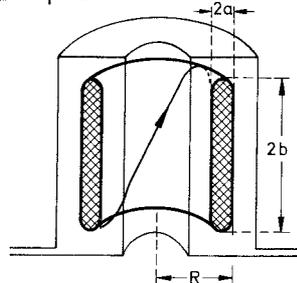




▲ Abb. 10



Belt pinch



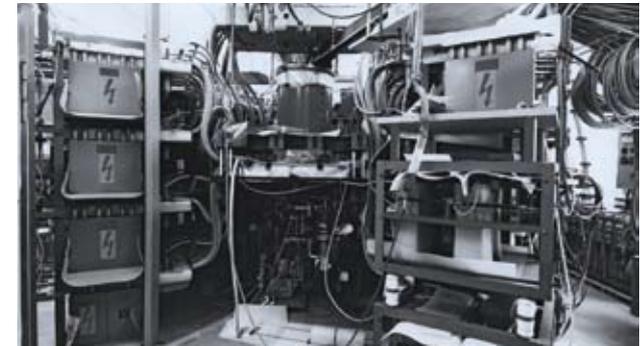
Konfiguration

▲ Abb. 12

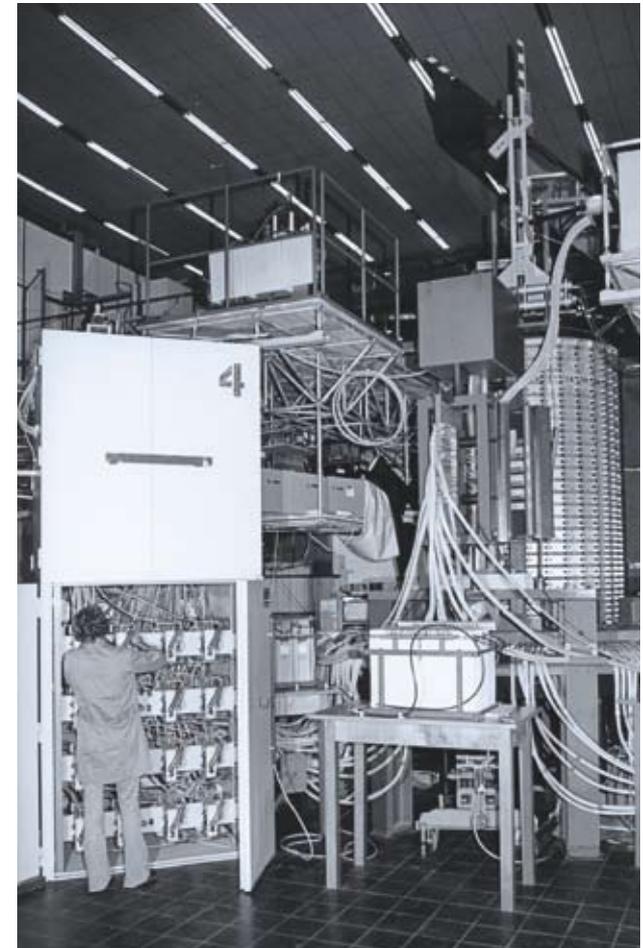
stufen konnten die zunächst aus theoretischen Überlegungen gefolgerten Vorteile der Querschnittsverformung gezeigt werden. Es ließen sich Plasmen mit Beta-Werten von einigen 10 Prozent für die durch Energieverluste gegebene Zeit von etwa 100 Mikrosekunden stabil einschließen. Dabei lag diese Energie-Einschlusszeit um rund zwei Größenordnungen über der typischen Anwachzeit von Plasmainstabilitäten, wie sie von theoretischen Rechnungen vorhergesagt wurden.

Inzwischen standen für Tokamaks jedoch starke externe Heizquellen wie Neutralteilchen- oder Wellenheizung im Megawatt-Bereich zur Verfügung (siehe Kapitel 7), mit denen das Plasma stationär und nicht nur kurzzeitig, wie im Belt-Pinch, auf höhere Energiedichten gebracht werden kann. Auch der gestreckte Plasmaquerschnitt wurde in ersten Tokamak-Experimenten untersucht: Man musste sich daher entschließen, den Belt-Pinch als erstes, unvollkommenes Vorexperiment für die Tokamaks einzustellen. Nach fast zehnjähriger Arbeit wurde Anfang 1979 mit dem Belt-Pinch IIa⁹ (Abb. 13) die Serie der Belt-Pinch-Experimente im IPP abgeschlossen.

Das mit den unterschiedlichen Pinch-Anlagen gewonnene physikalische Verständnis der Vorgänge im Plasma¹⁰ floss in die Arbeit an den aussichtsreicheren Konkurrenten der Niedrig-Beta-Linie – Tokamak und Stellarator – ein.



▲ Abb. 11



▲ Abb. 13

Abb. 9: Das zweite, der schraubenförmigen Gestalt des Plasmas angepasste Plasmagefäß für ISAR T1-B wird in die entsprechend geformte Thetapinch-Spule eingebaut.

Abb. 10: Aufbau des Screw-Pinch ISAR IV. Die Induktionswindung im Zentrum induziert einen starken Längsstrom im Plasma, dessen Magnetfeld zusammen mit dem Feld der einwindigen Spule das Plasma einschließt.

Abb. 11: Der kleine Screw-Pinch ISAR IV.

Abb. 12: Durch Übergang von einem kreisförmigen zu einem länglichen Plasmaquerschnitt lässt sich der toroidale Screw-Pinch in eine stabile Konfiguration überführen, den Belt-Pinch.

Abb. 13: Der Belt-Pinch IIa. Große, um das Entladungsgefäß herum angeordnete Kondensatorbatterien liefern extrem schnell ansteigende Ströme, deren Magnetfelder das Plasma zusammendrücken und dabei auf Temperaturen von vielen Millionen Grad aufheizen.