

II. Anfänge internationaler Fusionsforschung

1. Gegenstand und Zielrichtung der Plasmaphysik und Fusionsforschung

Ehe auf Beginn und Institutionalisierung der Fusionsforschung auf internationaler und nationaler Ebene eingegangen wird, sollen Gegenstand und Zielrichtung der Plasmaphysik und Fusionsforschung benannt werden.¹

Den Begriff "Plasma" prägte 1928 Irving Langmuir für Gase im Zustand der Ionisation. Ein normales Gas besteht aus einzelnen Atomen und Molekülen, deren Abstand zueinander so groß ist, daß sie sich frei bewegen und nur gelegentlich aufeinanderstoßen. Die Atome setzen sich aus einem winzigen elektrisch positiv geladenen Atomkern und einer Hülle negativ geladener Elektronen zusammen, wobei die Anzahl der Elektronen die positive Kernladung so kompensiert, daß das Atom als Gesamtes einen Zustand der Neutralität erhält. Wird ein solches Gas erhitzt, so steigert sich die Geschwindigkeit der Atome und die Wucht der Zusammenstöße, mit der sie aufeinanderprallen; dabei setzt schon bei einer Temperatur von einigen tausend Grad Celsius ein Prozeß ein, bei dem die Elektronen aus der Hülle der Atome herausgeschlagen werden und frei umherfliegen. Diesen Zustand, in dem die Neutralität der Atome aufgehoben ist, nennt man Ionisation. Ein Gas im Zustand der Ionisation ist ein Plasma. Die einfachste Form eines Plasmas ist das Wasserstoffplasma, da Wasserstoff aus einem positiv geladenen Proton und einem negativ geladenen Elektron besteht. Im Zustand der völligen Ionisation, bei etwa einhunderttausend Grad Celsius, sind alle Elektronen und Protonen voneinander getrennt; obwohl alle Teile elektrisch geladen sind, ist das gesamte Plasma aufgrund der gleichen Zahl positiver und negativer Ladungen in einem Zustand der "Quasi"-Neutralität.

¹ Die Angaben stützen sich vor allem auf Aufsätze von IPP-Mitarbeitern, in denen Überblicke über die Grundlagen der Plasmaphysik gegeben werden. Vgl. Biermann, Gewinnung von Atomenergie durch Kernverschmelzung; Fünfer, Institut für Plasmaphysik; Grieger, Aussichten; Lüst, Plasmen; Schlüter, Fusionsforschung; ders., Wozu Plasmaphysik?; Wienecke, Fusionsreaktor. Ein Überblick findet sich auch bei Küppers, Stand der Fusionsforschung, S. 144-150.

Der Plasmazustand gilt als eigener vierter Aggregatzustand der Materie neben den anderen Zuständen fest, flüssig, gasförmig. Der weitaus überwiegende Teil des Universums befindet sich im Plasmazustand. Von der Erde aus gesehen setzt der Plasmazustand ca. 100 km oberhalb der Erdoberfläche mit der sogenannten Ionosphäre ein. Fast der gesamte interplanetare und interstellare Raum und die Sterne sind im Plasmazustand. Planeten, die Trabanten der Sonne, Meteore, die Kerne der Kometen und die unteren Schichten der Atmosphäre der Planeten sind einige der wenigen Orte, die nicht im Plasmazustand sind, "kleine Tropfen neutraler Materie in einem Ozean von Plasma".²

Ein Plasma weist spezifische Eigenschaften auf, deren wichtigste die elektrische Leitfähigkeit und die Beeinflussbarkeit durch Magnetfelder sind. Bei Anlegen einer elektrischen Spannung an das Plasma werden die negativ geladenen Elektronen nach der einen, die positiven Ionen nach der anderen Seite gezogen; dadurch entsteht im Plasma ein elektrischer Strom, der Magnetfelder erzeugt, die wiederum auf die Plasmateilchen und die Ströme im Plasma einwirken. Ebenso ist ein Plasma durch äußere Magnetfelder zu beeinflussen. Ein weiteres grundlegendes Phänomen im Plasma ist die Entstehung von Plasmaschwingungen: Ist in einem Teil des Plasmas das Gleichgewicht von Ionen und Elektronen gestört, sind z.B. zu wenig Elektronen vorhanden, so zieht dieser Plasmateil Elektronen an; diese bewegen sich Richtung positiver Ladung, geraten in eine so hohe Geschwindigkeit, daß sie über die positive Ladung hinauschießen; dadurch werden wiederum Elektronen angezogen, so daß das gesamte Plasma in einen hochfrequenten Schwingungszustand gerät.³

Erhitzt man ein Plasma auf extrem hohe Temperaturen, so kann als weiterer Prozeß die Verschmelzung der positiv geladenen Atomkerne eintreten, d.h. die Kerne werden durch die Erhitzung auf so hohe Geschwindigkeiten gebracht, daß die normalerweise herrschende Coulombsche Abstoßungskraft zwischen zwei positiv geladenen Atomkernen überwunden wird und die Kerne so dicht zusammenkommen, daß sie miteinander verschmelzen. Bei diesem Prozeß werden sehr hohe Energien freigesetzt. Mittels des Prozesses der Kernfusion erzeugt die Sonne ihre Energie: Bei Temperaturen von rund 15 Millionen Grad im Sonneninneren findet im solaren Plasma der Prozeß der Kernfusion statt, bei dem das Element Helium gebildet wird. Die bei der Bindung freigesetzte Energie wandert als Lichtstrahlung durch die Sonne hindurch, wird in den höheren Schichten durch Konvektion transportiert und an der Oberfläche als Licht abgestrahlt.

Die Vorstellung, die Sterne würden ihre Energie aus Kernprozessen gewinnen,

² Lüst, Plasmen, S. 6.

³ Vgl. Schlüter, Wozu Plasmaphysik?, S. 48f.

formulierte 1926 der englische Astrophysiker A. S. Eddington, nachdem frühere Erklärungsversuche, wie die von R. Mayer formulierte Theorie, die Sonnenenergie entstehe aus in die Sonne stürzenden Meteoriten, und die von Helmholtz und Kelvin aufgestellte Theorie, bei einer fortdauernden Kontraktion der Sonne werde Gravitationsenergie in Wärme umgesetzt, sich als nicht stichhaltig erwiesen, letztere, weil sie die lange Existenzdauer der Sonne nicht erklären konnte.⁴ Ergänzt wurden seine Forschungen durch eine 1928 erschienene Arbeit von J. H. Jeans über "Astronomy and Cosmogony".⁵ 1929 veröffentlichten der österreichische Physiker Fritz Houtermans und sein englischer Kollege R. Atkinson in einem vielbeachteten Aufsatz 1929 in der Zeitschrift für Physik die Theorie, die Sonnenenergie könne aus der Verschmelzung leichter Atomkerne herrühren.⁶ Nahezu gleichzeitig entwickelten 1938 und 1939 C. F. von Weizsäcker und Hans Bethe das als Bethe-Weizsäcker-Zyklus bekannte Modell von in der Sonne ablaufenden Kernumwandlungsprozessen.⁷ Die Erforschung des Plasmas und seiner Eigenschaften wurde in den vierziger und fünfziger Jahren dann u.a. durch Hannes Alfvén, Thomas G. Cowling, Martin D. Kruskal, Martin Schwarzschild, Lyman Spitzer und Subramanyan Chandrasekhar weitergeführt. In Deutschland arbeiteten auf diesem Gebiet im KWI bzw. MPI für Physik u.a. Ludwig Biermann, Reimar Lüst, Arnulf Schlüter und C. F. von Weizsäcker, worauf später noch eingegangen wird.

Wissenschaftsgeschichtlich gesehen liegt eine Wurzel der Fusionsforschung in der Astrophysik und ihren Teildisziplinen Plasmaphysik und Magnetohydrodynamik. Der Großteil der grundlegenden Arbeiten zur Plasmaphysik in den vierziger und fünfziger Jahren diente dabei nicht den möglichen Anwendungen, sondern dem Verständnis und der Erklärung der extraterrestrischen Plasmen unter dem Einfluß kosmischer Magnetfelder. Eine weitere Wurzel der Fusionsforschung ist die Physik der Gasentladungen, der Untersuchung der Vorgänge elektrischer Entladungen in Gasen; die Ergebnisse der Forschungen im Bereich der Gasentladungsphysik finden u.a. Anwendung in der Entwicklung von Schaltern, Leuchtstoffröhren, Lichtbögen etc., im militärischen Bereich zum Beispiel in der Entwicklung von Sprengstoffen.⁸

Aufgabe der Fusionsforschung ist die Erforschung der Kernfusion mit dem Ziel, diese Energiequelle für irdische Verhältnisse nutzbar zu machen. Nachdem

⁴ Von Weizsäcker, Sternentstehung, S. 45f.

⁵ J. H. Jeans, Astronomy and Cosmogony, Cambridge University Press 1928. Vgl. hierzu Biermann, Kosmos, S. 63.

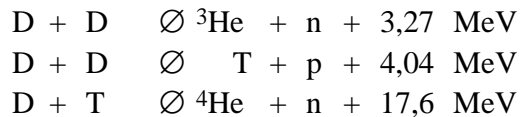
⁶ Vgl. zu den Anfängen Gerwin, Kernfusion. Der Aufsatz von Eddington "The Internal Constitution of the Stars" erschien 1926 in Cambridge; der Aufsatz von Atkinson und Houtermans 1929 in der Zeitschrift für Physik 54, 1929.

⁷ Vgl. von Weizsäcker, Sternentstehung, passim.

⁸ Vgl. hierzu die Kurzstudie von Eckert, Internationale Anstöße, S. 116.

der erforderliche Ausgangsstoff Deuterium, schwerer Wasserstoff, in nahezu unbegrenztem Umfang in den Weltmeeren vorhanden ist, stand am Anfang der Fusionsforschung der Traum von einer unerschöpflichen und sauberen Energiequelle.⁹

Grundsätzlich sind verschiedene Kernverschmelzungsreaktionen zwischen den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium mit unterschiedlicher Energieausbeute denkbar:¹⁰



Die Reaktion von Deuterium mit Deuterium hätte den großen Vorteil, daß die Ausgangsstoffe nicht radioaktiv sind. Dennoch arbeitet man heute mit der Verschmelzungsreaktion zwischen Deuterium und Tritium - wobei das radioaktive Tritium erst aus Lithium erbrütet werden muß -, da diese Reaktion einen sehr viel größeren Wirkungsquerschnitt aufweist als die zwischen Deuterium und Deuterium und niedrigere Temperaturen erforderlich sind; außerdem wäre der für die D-D-Reaktion erforderliche Plasmadruck um einen Faktor zehn höher als bei der D-T-Reaktion. Ausgangspunkt der heutigen Forschung ist also die Reaktion zwischen Deuterium und Tritium, wobei als Verschmelzungsprodukt ein Heliumkern entsteht und eine Energie von ca. 17,6 MeV freigesetzt wird, deren Träger in überwiegendem Maße das bei der Fusion freigesetzte Neutron ist. Diese Neutronen werden wiederum dafür eingesetzt, Tritium aus Lithium zu erbrüten.

Um den Energiegewinnungsprozeß der Sonne für irdische Zwecke nutzbar zu machen, sind grundsätzliche Probleme zu lösen:

1. Das Plasma muß auf Temperaturen aufgeheizt werden, bei denen Kernverschmelzungsreaktionen stattfinden können.
2. Das Plasma muß hinreichend lange eingeschlossen werden.
3. Es ist eine bestimmte Teilchendichte erforderlich.

1957 formulierte der englische Physiker Lawson in dem sogenannten "Lawsonkriterium" die erforderlichen Werte für das Produkt von Temperatur und

⁹ Vgl. zum Beispiel die Rede Otto Hahns auf der Hauptversammlung der MPG 1958, der angesichts der Entwicklung der Atombombe eingestand, er überlege seit Jahren gelegentlich, "ob es nicht besser wäre, die ganze Nutzbarmachung der Atomenergie sei niemals Tatsache geworden"; als Beispiel für eine positive Entwicklungsmöglichkeit führt er dann den Fusionsreaktor an, dessen Entwicklung nach damaligem Wissensstand nicht zugleich zur Gewinnung der Wasserstoffbombe dienen könnte und bei dem im Gegensatz zu den Spaltreaktoren Uran, Plutonium und Atomstaub wegfielen; Rede Otto Hahns auf der Hauptversammlung der MPG 1958 in Hannover, in: Mitteilungen aus der MPG, Heft 4, 1958, S. 221-223.

¹⁰ Vgl. Wienecke, Fusionsreaktor, S.86f.

Dichte eines Plasmas und die nötige Einschließungszeit, damit ein energieliefernder thermonuklearer Reaktor betrieben werden kann. Erforderlich sind Temperaturen von mindestens 100 Millionen Grad Celsius, eine Teilchendichte von 10^{14} cm^{-3} - das entspricht ungefähr einem Millionstel der Dichte normaler Luft.

Aufgrund dieser unvorstellbar hohen Temperaturen kann ein Plasma nicht durch ein herkömmliches Gefäß eingeschlossen werden, da jedes konventionelle Material unweigerlich verdampfen und auch das Plasma zur Abkühlung bringen würde. Eine derzeit denkbare Möglichkeit besteht darin, das Plasma unter Ausnutzung seiner elektrischen Leitfähigkeit durch Magnetfelder einzuschließen; dabei sind verschiedene Anordnungen denkbar, auf die weiter unten noch eingegangen wird. (Bei der Sonne wird das Plasma durch den Gravitationsdruck selber eingeschlossen.)

Die Probleme, die sich der Verwirklichung des Ziels eines energieliefernden Fusionsreaktors stellen, sind so enorm, daß das Gelingen auch heute noch nicht garantiert ist. Im einzelnen stellen sich die folgenden Aufgaben:

1. Erzeugung eines Plasmas, Studium seines Verhaltens unter Berücksichtigung der zahlreichen Mikro- und Makroinstabilitäten. Auch kleine im Plasma auftretende Störungen wirken auf das einschließende Magnetfeld zurück und verändern es; es entsteht ein Ungleichgewicht, das im Extremfall zum Entweichen des Plasmas aus dem einschließenden Magnetfeld führt.
2. Die Entwicklung geeigneter Magnetfeldkonfigurationen zum Einschluß des Plasmas. Aufgrund des instabilen Plasmaverhaltens läßt sich ein Gleichgewicht zwischen Plasma und Magnetfeld nur schwer aufrechterhalten, das Plasma neigt dazu, aus dem Magnetfeld zu entweichen.
3. Die Entwicklung geeigneter Heizmethoden.
4. Die Entwicklung der Plasmadiagnostik, geeigneter Meßmethoden für Temperatur, Plasmaströmungen und -felder, ohne das Plasma durch die Messungen zu stören.
5. Entwicklung geeigneter Materialien für die Reaktorwände, was aufgrund der extremen Bedingungen, unter denen die Fusion nur stattfinden kann, höchste Anforderungen an Oberflächenphysik und Technologieentwicklung stellt. Vorrangiges Problem ist die erste Plasmawand, innerhalb derer das Plasma durch Magnetfelder eingeschlossen wird. Bei der Wechselwirkung von Plasma mit erster Wand werden schwere Atome aus der Wand gelöst, die das Plasma verunreinigen und zu dessen Abkühlung und Instabilitäten führen. Zugleich ist die erste Wand intensiver Neutronenstrahlung ausgesetzt, die zur Korrosion der Wand und zur radioaktiven Verseuchung des Materials führt; in einem Fusionsreaktor müßten auch aufgrund der thermischen Belastung die

umgebenden Wände sehr häufig ausgetauscht werden, was das Problem der Entsorgung der verseuchten Materialien mit sich bringt.

6. Der Umgang mit dem radioaktiven Tritium, seiner Erbrütung und der Handhabung im geplanten ferngesteuerten Betrieb. Zwar weist das Tritium eine gegenüber herkömmlichen Spaltprodukten wesentlich kürzere Zerfallszeit auf (ca. 12,3 Jahre), es hat jedoch die Eigenschaft, durch alle Materialien hindurch zu diffundieren und stellt ein Gefährdungspotential dar. Die Forschungen mit Tritium begannen relativ spät, da man zunächst mit Modellplasmen arbeitete.
7. Das Problem der Umwandlung und Auskopplung der über Fusionsprozesse gewonnenen Energie.
8. Die in den bisherigen Experimenten gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse lassen sich nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse im Reaktorbetrieb extrapolieren. Deshalb müssen die Experimente immer größere Dimensionen bis hin zur Reaktordimension annehmen.

Es wurden im Verlauf der fusionsorientierten Forschungen einige Versuchsanordnungen entwickelt, die in ihrer Elementarstruktur seit Beginn der Fusionsforschung unverändert blieben.¹¹ Das Plasma kann entweder durch äußere oder durch im Plasma selber erzeugte Magnetfelder eingeschlossen werden. Unter dem Gesichtspunkt der Geometrie sind lineare oder torusförmige Anordnungen denkbar. Außerhalb des Plasmas werden Magnetfelder durch äußere Spulen erzeugt; für den Reaktorbetrieb sind supraleitende Spulen erforderlich. Innerhalb des Plasmas wird ein Strom erzeugt - z.B. in linearen Anordnungen durch zwei Elektroden an den Enden der Plasmasäule -, der das Gas zum Plasma ionisiert; durch den im Plasma fließenden Strom wird ein Magnetfeld aufgebaut, das den Plasmastrom ringförmig umschließt, dadurch von den Wänden isoliert; durch Kompression wird das Plasma weiter aufgeheizt. Eine derartige Anordnung, "Pinch" genannt, liefert also das zweifache Ergebnis des Plasmaeinschlusses und der Aufheizung. Das Prinzip der magnetischen Kompression wird prinzipiell zur Erreichung von Plasmen hoher Dichte und Temperatur benutzt. In einer das Plasma umgebenden Spule bringt man ein zunächst schwaches Magnetfeld durch schnell ansteigende Ströme auf so hohe Werte, daß das Plasma unter starkem Temperaturanstieg zusammengedrückt wird.

Die an sich einfachere zylinderförmige Anordnungsgeometrie hat den Nachteil, daß das Plasma innerhalb kürzester Zeit an den Enden des Rohrs wieder ausströmt; um ein brennendes Plasma genügend lange aufrechtzuerhalten, wären

¹¹ Verständliche Kurzübersblicke zu verschiedenen experimentellen Anordnungen finden sich im Themenheft der Atomwirtschaft 1963 über Kernfusion und Plasmaphysik, vor allem Biermann, Internationale Fusionsforschung; vgl. auch Schlüter, Wozu Plasmaphysik?; ders., Fusionsforschung; Lüst, Thermonukleare Fusion.

kilometerlange Plasmaröhre notwendig. Seit Beginn der Fusionsforschung sind verschiedene Modelle entwickelt worden, um das Ausströmen des Plasmas zu verhindern. Eines der bekanntesten ist der sogenannte magnetische Spiegel: In einer zylindersymmetrischen Anordnung werden die Magnetfelder an den Enden der Plasmaröhre so verstärkt, daß sie höhere Feldstärken aufweisen als in der Mitte des Plasmaschlauches; die geladenen Teilchen, die im Plasma um die magnetischen Feldlinien spiralen, werden an den Enden reflektiert und sind somit größtenteils gefangen.

In den toroidalen Anordnungen, mit denen überwiegend gearbeitet wird und die als Grundmodell für einen Fusionsreaktor dienen, entfällt zwar das Problem des Ausströmens des Plasmas; dafür entsteht das neue Problem, daß in der Torusanordnung das Magnetfeld auf der Innenseite des Plasmas stärker ist als auf der Außenseite, so daß das Plasma zum schwächeren Magnetfeld Richtung Außenwand abdriftet. Um das Abdriften zu verhindern und das Plasmagleichgewicht aufrechtzuerhalten, sind weitere Magnetfelder erforderlich. Dabei besteht entweder die Möglichkeit, bei einem Plasmaeinschluß durch äußere Magnetfelder einen zusätzlichen Strom innerhalb des Plasmas fließen zu lassen, wie es in den heutigen Versuchsanordnungen des Typus Tokamak der Fall ist; dies bietet den Vorteil des gleichzeitigen Aufheizens, den Nachteil, daß der Strom innerhalb des Plasmas nur begrenzte Zeit aufrechterhalten werden und ein auf dieser Anordnung beruhendes Reaktormodell ohne zusätzliche Maßnahmen nur im gepulsten Betrieb arbeiten kann. Die andere Möglichkeit liegt darin, außerhalb des Plasmas zusätzliche äußere Magnetfeldspulen anzubringen, mittels derer die Drift kompensiert werden soll. Eine solche Konzeption, auf der die Stellaratoranordnungen beruhen, ermöglicht einen stationären Reaktorbetrieb. Tokamak und Stellarator sind heutzutage Forschungsschwerpunkte am IPP. Ende der sechziger Jahre wurde schließlich verstärkt mit der sogenannten Trägheitseinschlußfusion gearbeitet; dabei wird das Fusionsmaterial zuerst komprimiert und dann aufgeheizt, indem eine große Energiemenge durch einen sogenannten "Treiber" über Laser, eine Ionen- oder Elektronenquelle oder eine Spaltbombe zugeführt wird. Die Treiberenergie bewirkt Abdampfen von Oberflächenmaterial, es kommt durch den entstehenden Ablationsdruck zur Implosion des inneren Teils des Fusionsmaterials. Wenn die Dichte ihr Maximum erreicht hat, kommt es zur Aufheizung des inneren Teils des Brennstoffs, so daß Fusionsreaktionen stattfinden können. Die freiwerdende Energie heizt den Rest des Brennmaterials ebenfalls auf Fusionstemperaturen auf. Der Prozeß muß abgeschlossen sein, bevor sich das Material ausdehnt, also solange es durch seine

eigene "Trägheit" eingeschlossen ist.¹² Am IPP wurden derartige Experimente mittels Lasern siebziger Jahren durchgeführt, dann jedoch ausgegliedert, was zur Gründung des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik führte.

¹² Darstellung nach Annette Schaper, Kann Rüstungskontrolle schon in dem frühen Stadium von Forschung und Entwicklung einer neuen Technologie einsetzen?-Beispiel Trägheitseinschlußfusion, Institut für Kernphysik, Technische Hochschule Darmstadt, 1988, S. 4.

2. Anfänge internationaler Fusionsforschung¹³

2.1. Beginn der Forschungen in Großbritannien und den USA

Erste theoretische Überlegungen zur kontrollierten Kernfusion entstanden in den USA noch während des Manhattan-Projekts. In Edward Tellers sogenannten "wild ideas"-Seminaren fanden diesbezügliche Diskussionen, systematischer seit Kriegsende, statt, an denen u.a. Enrico Fermi, John von Neumann, James Tuck und Luis Alvarez teilnahmen. Teller selber gibt an, bei diesen Diskussionen seien entscheidende Voraussetzungen, unter denen energieliefernde Verschmelzungsreaktionen stattfinden könnten, bereits geklärt worden; Experimente waren allerdings noch nicht in Angriff genommen worden.¹⁴ Demgegenüber wurde in England frühzeitig ein theoretisches und experimentelles Forschungsprogramm zur kontrollierten Fusion begonnen, zunächst durch George B. Thomson, Physikprofessor an der Londoner Universität, der bisher auf den Gebieten der Kernphysik und der Physik der Gasentladungen gearbeitet und während des Krieges eine wichtige Rolle im Atombombenprojekt gespielt hatte. Seit Ende 1945 stellte Thomson Berechnungen an, die unter Mitarbeit von Moses Blackman zum Thomson/Blackman-Patent von 1946 führten, das den Plasmaeinschluß nach dem Pinch-Prinzip vorsah. Thomson wies auf die zweifache Möglichkeit hin, mittels der vorgeschlagenen Versuchsanordnung Energie zu produzieren und sie als Neutronen- oder Tritiumquelle zu nutzen und

¹³ Hier soll vor allem auf die Anfänge der Fusionsforschung in den USA eingegangen werden, wo das breiteste Programm zur Fusionsforschung in den fünfziger Jahren entwickelt wurde; hierzu liegt eine ausführliche Darstellung vor von Bromberg, Fusion, auf die sich, sofern nicht anders angegeben, die folgende Darstellung der amerikanischen Entwicklung im wesentlichen bezieht. Ein Kurzüberblick zur internationalen Entwicklung findet sich bei Eckert, Internationale Anstöße, S. 116-119. Ein Überblick über das amerikanische Geheimprojekt zur Fusionsforschung findet sich in Bishop, Project Sherwood. Für die englische Entwicklung vgl. Hendry, Origins; für die russische Entwicklung, auf die nicht näher eingegangen wird, vgl. I. N. Golowin, I. W. Kurtschatow. Wegbereiter der sowjetischen Atomforschung, Leipzig 1976. Gute Kurzüberblicke über die Entwicklung in den einzelnen Ländern geben die Vorträge auf der Hauptsitzung zur Kernfusion auf der 2. Genfer Atomkonferenz. Für zahlreiche Hinweise zur internationalen Entwicklung danke ich Michael Eckert.

¹⁴ Vgl. den Vortrag Tellers, Peaceful Uses of Fusion, auf der 2. Genfer Atomkonferenz, S. 27; Die einzelnen Erkenntnisse hätten das "most advanced knowledge available at the time to a group of the world's most distinguished physicists" dargestellt. So sei im einzelnen bekannt gewesen, daß eine D-T-Reaktion niedrigere Temperaturen erfordere als eine D-D-Reaktion, daß eine Teilchendichte von annähernd 10¹⁴-10¹⁵ Teilchen pro cm³ erforderlich sei, daß durch geeignete Magnetfeldkonfigurationen Plasmaverluste über den Wandkontakt reduziert werden könnten; auch die Driftbewegung des Plasmas in toroidalen Anordnungen sei vorhergesagt worden. Hendry, der über die Anfänge der englischen Fusionsforschung gearbeitet hat, zieht die optimistische Einschätzung allerdings in Zweifel, vgl. Hendry, Origins, S. 160.

damit militärischer Nutzung zu öffnen.¹⁵ Im Januar 1947 berief Cockcroft, der Leiter des Atomic Energy Research Establishment (AERE) in Harwell, auf Drängen Thomsons ein Treffen zur Diskussion eines möglichen übergreifenden Forschungsprogramms zur kontrollierten Fusion ein, an dem außer Thomson und Blackman Physiker der Universität Birmingham und des Kernforschungszentrums Harwell teilnahmen; aus dieser Tagung ergab sich noch nicht die Planung eines größeren Forschungsprogramms. 1947 begann Thomson unter Mitarbeit von einigen Schülern mit Experimenten.¹⁶ Ebenfalls 1947 startete Peter Thonemann, der zweite Pionier der Frühzeit der englischen Fusionsforschung, grundlegende Untersuchungen zum Einschluß heißer, elektrisch leitfähiger Gase durch Magnetfelder, seit 1948 unterstützt durch das Harweller Zentrum. Im Herbst 1949 führte Thonemann unter Teilnahme von Cockcroft ein erfolgreiches Experiment vor, und noch im selben Jahr übernahm Harwell die Finanzierung von Thonemann und einem Assistenten. Ein Jahr später siedelte das Projekt nach Harwell über. Schon zuvor hatte sich unter Schirmherrschaft des UK AERE ein Diskussionskreis über Fusionsforschung gebildet, an dem Thomson, Blackman, Thonemann und Tuck teilnahmen; letzterer war nach Abschluß seiner Arbeiten am Manhattan-Projekt nach England zurückgekehrt, traf dort Thonemann und begann mit Arbeiten an Pinch-Experimenten, ging kurz darauf aber wieder nach Amerika, um am Projekt der Entwicklung der Wasserstoffbombe mitzuarbeiten.¹⁷

Thomsons frühe Pläne, eine große Versuchsanordnung im neu errichteten Aldermaston Court Laboratory der Associated Electrical Industries (AEI) zu beginnen, stießen bei Cockcroft auf Widerstand. Zum einen beurteilte er ein derartiges großes Experiment zu dem Zeitpunkt als unrealistisch und zeitlich verfrüht; zum anderen führte die mögliche Verwendung der kontrollierten Fusion als Neutronenquelle zur Plutoniumproduktion bei Cockcroft zur Überzeugung, derartige Forschungen dürften nur unter strenger Geheimhaltung unter Kontrolle des Harweller Zentrums durchgeführt werden. Auch ein Vorschlag Thomsons für eine kleine Versuchsanordnung Anfang 1948 wurde nicht befürwortet. In einem im Juli 1949 einberufenen Treffen entschied man, das kleinere Modell über einen Entwicklungsvertrag zwischen Harwell und dem Londoner Institut durchzuführen. 1951 siedelte die Londoner Gruppe dann doch nach Aldermaston über. 1956 begann am Atomic Weapons Research Establishment eine weitere kleine Gruppe mit Forschungen zur kontrollierten Kernfusion.¹⁸

¹⁵ Vgl. zu den Details des Patents Hendry, Origins, der detailliert auf die wissenschaftlichen Anfänge der englischen Fusionsforschung eingeht. Ein weiterer Kurzüberblick über die Anfänge der englischen Fusionsforschung findet sich bei Bromberg, Fusion, S. 73-75 und im Vortrag Thonemann's auf der 2. Genfer Atomkonferenz, Thermonuclear Research, S. 34-38.

¹⁶ Einzelheiten finden sich bei Hendry, Origins, S. 163-167.

¹⁷ Vgl. Bromberg, Fusion, S. 20f.

¹⁸ Die Darstellung stützt sich auf den Aufsatz von Hendry, Origins.

In den USA fand im Sommer 1942 auf Einladung Robert Oppenheimers an der Universität Berkeley, Kalifornien, ein Seminar über Kernverschmelzungsreaktionen statt. Bei dieser Gelegenheit trug Teller, der in die Geschichte der nuklearen Waffenentwicklung als "Vater der Wasserstoffbombe" einging, seine Idee vor, eine gegenüber der herkömmlichen Atombombe heftigere Explosion und entsprechend schrecklichere Wirkung zu erreichen, indem die Uranbombe mit einem Mantel aus Deuterium und Tritium umgeben und so zum Zünder für die Wasserstoffbombe werden würde.¹⁹

Die ersten Forschungen zur kontrollierten Fusion entstanden in engem Zusammenhang mit den Entwicklungsarbeiten zur Wasserstoffbombe. In Princeton wurden am Forrestal Research Center theoretische Berechnungen zur Entwicklung der Wasserstoffbombe durchgeführt unter dem Codenamen "Project Matterhorn", an dem Lyman Spitzer, Astrophysiker mit Forschungsschwerpunkt Plasmaphysik, als Theoretiker teilnahm. Der äußere Anstoß, der Spitzer zu Überlegungen zur Durchführbarkeit der kontrollierten Kernverschmelzung anregte, kam von Zeitungsberichten über angeblich erfolgreiche Experimente zur kontrollierten Fusion in Argentinien, die auf der Insel Huemul unter dem in Österreich geborenen Physiker Ronald Richter durchgeführt wurden. Trotz der Skepsis, die man der Meldung entgegenbrachte, geriet die kontrollierte Kernverschmelzung ins Bewußtsein der Öffentlichkeit.²⁰ Spitzers theoretische Überlegungen mündeten in das Stellaratorkonzept ein. Das Problem des Abdriftens des Plasmas suchte Spitzer zu lösen, indem statt eines einfachen Torus eine Anordnung in Form einer Acht gewählt wurde, faktisch zwei miteinander verbundene Tori, wodurch die Drift kompensiert wurde; das Modell wurde Figure-8-Stellarator oder auch "Pretzel" genannt. Gemeinsam mit den Astrophysikern Martin Schwarzschild und Martin Kruskal nahm Spitzer theoretische und experimentelle Arbeiten auf. Im Januar 1952 unterbreitete Spitzer der Division of Research der AEC den Vorschlag eines experimentellen Programms, das vorsah, in einer Abfolge verschiedener Stellarator-"Generationen" in den Bereich reaktorähnlicher Dimensionen vorzustoßen.

In Los Alamos konzentrierten sich die ersten Untersuchungen um den Engländer James Tuck, der im Frühjahr 1951 von Spitzers Plänen erfuhr. Tuck, der Spitzers Projekt als "incredibly ambitious"²¹ beurteilte, begann neben seiner hauptamtlichen Mitarbeit am H-Bombenprojekt mit einem Experiment in der Anordnung eines toroidalen Pinch, das er, in Abgrenzung zu Spitzers Optimismus, "Perhapsatron" nannte; der Umstand, daß über die Forschungen zur

¹⁹ Vgl. Gerwin, Kernfusion, S. 26.

²⁰ Vgl. zu den Princeton Anfängen der Fusionsforschung Bromberg, Fusion, S. 12-15; zu dem argentinischen Vorfall Gerwin, Kernfusion, S. 30-34.

²¹ Bromberg, Fusion, S. 21.

H-Bombe hochentwickelte Diagnosetechniken zur Verfügung standen, wirkte dabei fördernd auf die Forschungen ein.²²

In Forschungszentrum Livermore wurden ebenfalls Entwicklungsarbeiten zur H-Bombe durchgeführt. Anfang 1952 hatten Teller und Ernest O. Lawrence, Leiter des Radiation Laboratory in Livermore, vereinbart, in Livermore ein neues Zentrum, das sich auf die Entwicklung der sogenannten "Super" konzentrierte, zu begründen.²³ Im September 1952 beteiligten sich dort bereits 123 Wissenschaftler und Techniker an der Waffenentwicklung. Ein Schüler von Lawrence, Herbert F. York, der leitend an dem Programm zur Entwicklung der "Super" beteiligt war, ließ sich durch Kontakte mit Spitzer und Tuck ebenfalls zur Aufnahme von Forschungen zur kontrollierten Fusion anregen, kurz darauf schloß sich Richard Post, ein Hörer von Yorks Vorlesungen über Fusionsprobleme, den Arbeiten an. In Livermore lag der Schwerpunkt der Forschung auf magnetischen Spiegelmaschinen.²⁴

Alle Forschungen wurden im Zeitraum 1951/2 in kleinem Rahmen durchgeführt, da die wenigen beteiligten Wissenschaftler nur einen kleinen Teil ihrer Zeit diesen Forschungen widmen konnten. Um 1952 setzte eine Wende ein. Der jetzige Leiter der Division of Research der AEC, Thomas H. Johnson, zeigte ungewöhnliches Interesse an der Fusionsforschung, und die fünf Mitglieder der Atomkommission teilten diese Aufgeschlossenheit. Vor dem Hintergrund eines ausgearbeiteten Vorschlags Princetons zur weiteren experimentellen Entwicklung schlug Johnson der Atomkommission die Aufnahme eines umfassenden allgemeinen Forschungsprogramms zur kontrollierten Fusion vor. Im Juni 1952 fand in Denver eine Geheimkonferenz statt, an der ca. achtzig Personen teilnahmen und die laut Bromberg zur Geburtsstunde der amerikanischen fusion community wurde.²⁵ Während die Wissenschaftler überwiegend für die Freigabe der Forschungen eintraten, bestand die Kommission angesichts der militärischen Nutzungsmöglichkeiten, die vor allem in der Tritiumerzeugung und der Nutzung der Fusionsneutronen für die Erbrütung von Plutonium, aber auch in weiteren militärisch bedeutenden Nebenwirkungen liegen,²⁶ auf der Geheimhaltung. Eine günstige Voraussetzung für die Ausweitung der Forschungen stellte der vorauszusehende Rückgang der militärischen Forschungen nach Abschluß der

²² Vgl. zum Beginn der Arbeiten in Los Alamos Bromberg, Fusion, S. 25f.

²³ Vgl. Hewlett/Duncan, Atomic Shield, S. 581-584.

²⁴ Vgl. Bromberg, Fusion, S. 27f.

²⁵ Vgl. Bromberg, Fusion, S. 31.

²⁶ Eckert weist darauf hin, daß "Kurzzeiteffekte, hydrodynamische Vorgänge (Stoßwellen etc.), Plasmadiagnostik-Verfahren (Mikrowellen, Spektroskopie etc.), Plasma-Wand-Wechselwirkungen usw [...] Anwendungen in der Sprengstoff-, Triebwerks-, Raketen-, Radar- und Werkstofftechnik" haben; Eckert, Internationale Anstöße, S. 117. Eine weitere Anwendung lag in der Hoffnung auf eine sauberen Zündung der H-Bombe.

Entwicklung der H-Bombe dar; freiwerdende Forschungskapazitäten konnten für die kontrollierte Kernfusion genutzt werden. Der endgültige Durchbruch zur Ausweitung der Fusionsforschung hing mit der Ernennung von Lewis Strauss zum Leiter der AEC durch US-Präsident Eisenhower zusammen. Strauss, mit Teller treibende Kraft bei der Entscheidung für die Entwicklung der H-Bombe - "to Teller and Strauss, for the United States to be the first with the hydrogen bomb was worth almost any price"²⁷ - lenkte jetzt seine Initiative und seinen Ehrgeiz auf die Entwicklung der kontrollierten Fusion, wobei die Tatsache, daß der Beratende Ausschuß der AEC in seiner Stellungnahme gegen die H-Bombe anführte, es seien keine zivilen Anwendungsmöglichkeiten vorauszusehen, einen zusätzlichen Anreiz für Strauss darstellte, das Gegenteil unter Beweis zu stellen.²⁸ Waren die einzelnen Projekte kaum untereinander koordiniert und die Zuständigkeiten aufgesplittet - Los Alamos unterstand der Division of Military Application, Livermore der Division of Reactor Development, Princeton der Division of Research der AEC -, so setzte jetzt ein Prozeß der Zentrierung und Koordinierung ein. Johnson blieb für das Gesamtprogramm verantwortlich, es wurde jedoch ein eigener Beauftragter für die Fusionsforschung, der Hochenergiephysiker Amasa S. Bishop, eingesetzt. Zur Koordinierung der Zentren untereinander wurde ein Steering-Comitee gebildet, dem je ein Mitglied der Hauptzentren angehörte; Livermore war durch Teller, Los Alamos durch Tuck, Princeton durch Spitzer vertreten, 1954 kam der leitende Ingenieur des Berkeley Radiation Laboratory, William N. Brobeck hinzu; den Vorsitz übernahm Lewis Strauss. Das gesamte Forschungsprogramm lief unter strengster Geheimhaltung unter dem Codenamen "Project Sherwood". Unter Strauss' Einfluß weitete sich das Programm schlagartig aus. Allein zwischen 1953 und 1955 verzehnfachte sich das Arbeitsprogramm.²⁹ Die Abstimmung untereinander vollzog sich auf den sogenannten Sherwoodkonferenzen, die drei bis viermal jährlich stattfanden. Zunächst wurden die bestehenden Programme intensiviert, wobei die Laboratorien ihre Autonomie weitgehend behielten. Als weiteres Forschungszentrum kam Oak Ridge hinzu, das ab 1955 seine Kapazitäten auf diesem Gebiet sprunghaft ausweitete, für den Bereich der angewandten Mathematik und Informatik das Institute of Mathematical Sciences, New York. Spätesten ab 1955 nahm das Programm Züge eines "Crash"-Programms an, laut Bromberg mit der Folge, daß sich bei geringer Theorieentwicklung im experimentellen Bereich die Methode des "trial and error"

²⁷ Hewlett/Duncan, Atomic Shield, S. 536.

²⁸ Vgl. Bromberg, Fusion, S. 36f.

²⁹ Vgl. Bericht über die US-Arbeiten auf dem Gebiet der Kernverschmelzung, atw Januar 1956, S. 37.

durchzusetzen begann.³⁰ Eine Dämpfung des Optimismus erfolgte allerdings zwischenzeitlich schon 1954, als theoretische Berechnungen ein instabiles Plasmaverhalten vorhersagten.³¹ In der Folge schlug man vor allem in Princeton eine langsamere Gangart ein; 1957 widmete man den ursprünglich in Reaktordimension geplanten C-Stellarator zu einem Forschungsexperiment um, unter anderem deshalb, weil in den vorangegangenen Experimenten eine unerwartet große Diffusion von Plasmateilchen aus dem Plasmaring, das sogenannte "pump out", beobachtet wurde.³²

Experimente an linearen Pinch-Anordnungen hatten unterdessen Neutronenproduktionen gezeigt, die den Rückschluß auf sehr hohe Plasmatemperaturen zuließen. In Los Alamos wurde daraufhin das größere Experiment Columbus geplant. Allerdings stellte sich später heraus, daß die Neutronen nicht aus Fusionsprozessen stammten.³³

Ein weiteres Mal wurde die Öffentlichkeit 1955 anlässlich der ersten Genfer Atomkonferenz auf die Forschungen zur kontrollierten thermonuklearen Fusion aufmerksam. Auf der Konferenz im August 1955 war die Fusion aufgrund der internationalen Geheimhaltung kein offizielles Thema. In seiner einleitenden Rede wies der Präsident der Konferenz, der indische Atomphysiker Bhabha, jedoch auf die Möglichkeit der Energiegewinnung aus kontrollierten Kernfusionsprozessen hin und gab als Zeitraum bis zur Entdeckung eines geeigneten Verfahrens die - sprichwörtlich gewordenen - zwanzig Jahre an: "It is well known that atomic energy can be obtained by fusion process as in the H-bomb, and there is no basic scientific knowledge in our possession today to show that it is impossible for us to obtain this energy from the fusion process in a controlled manner. The technical problems are formidable, but one should remember that it is not yet fifteen years since atomic energy was released in an atomic pile for the first time by Fermi. I venture to predict that a method will be found for liberating fusion energy in a controlled manner within the next two decades. When that happens, the energy problems of the world will truly have been solved forever for the fuel will be as plentiful as the heavy hydrogen in the oceans".³⁴ In der Folge sahen sich auch Lewis Strauss und John Cockcroft veranlaßt, die Tatsache der Erforschung der kontrollierten Kernverschmelzung in ihren Ländern einzugestehen, wobei sich der britische Fusionsforscher Thomson den Zeitraum von zwanzig Jahren ebenfalls

³⁰ Vgl. Bromberg, Fusion, S. 49: "The overabundance of funds and the pressure to find ways to spend them meant that equipment for almost any plausible confinement scheme would be funded."

³¹ Vgl. Eckert, Internationale Anstöße, S. 128.

³² Vgl. die entsprechenden Passagen bei Bromberg, Fusion, S. 60-64; Eckert, Internationale Anstöße, S. 129.

³³ Vgl. Bromberg, Fusion, S. 69.

³⁴ Zitiert nach Artsimovich, Research, S. 20.

zueigen machte.

Die Presse handelte die Ankündigungen zum Teil als Sensation.³⁵ In die visionäre Literatur über die Möglichkeit eines goldenen Atomzeitalters fand auch die kontrollierte Kernfusion Eingang: "An dem Tage, wo es gelingen wird, die thermonukleare Fusion unter Kontrolle zu bringen, wird eine neue Revolution stattfinden und all unser derzeitiges Wissen über das Atom wird nur noch die prähistorische Stufe des neuen Zeitalters darstellen."³⁶ Die ersten Opfer der Nutzbarmachung der Fusion würden die Unternehmen der Kernspaltungs-Industrie selber sein, und der Preis der Energieerzeugung durch Fusion wurde auf gleich Null geschätzt. Es fanden sich Zeitgenossen, die mit dem Gelingen der thermonuklearen Reaktion gleich die Umwandlung der Erdoberfläche und die Änderung des Klimas auf die Tagesordnung setzen wollten;³⁷ einer aus heutiger Sicht, wo die gefährlichen Folgen einer solchen Einstellung bekannt sind, kaum mehr nachvollziehbaren Haltung.

Das abgesehen von der zweiten Genfer Atomkonferenz 1958 wohl bedeutendste Ereignis für die weitere Entwicklung der internationalen Fusionsforschung fand im Frühjahr 1956 statt. Der russische Wissenschaftler I. W. Kurtschatow berichtete am 25.4.1956 im englischen Atomforschungszentrum Harwell in einem aufsehenerregenden Vortrag über russische Ergebnisse der Fusionsforschung; die Experimente standen unter Leitung von L. A. Artsimovich, die theoretischen Forschungen unter Leitung von M. A. Leontovich.³⁸ Bei Höchsttemperatur-Experimenten am sogenannten schnellen Pinch hatten russische Wissenschaftler schon 1952 Neutronenexplosionen gefunden und später ebenfalls festgestellt, daß die Neutronen nicht aus Fusionsprozessen stammten. Zugleich bemerkte man, daß während des Aufbaus des Stroms im Plasma ein Großteil der Energie durch Kontakt des Plasmas mit den Wänden verlorenging, so daß herkömmliche Pinchanordnungen als ungeeignet zum Erreichen der nötigen Temperaturen erschienen. Vorgeschlagen wurde das Modell des stabilisierten Pinch durch die Errichtung eines zusätzlichen Magnetfeldes in äußeren Spulen.³⁹ Neben den wissenschaftlichen Erkenntnissen lag die entscheidende Bedeutung des Harwell-Vortrags in der Durchbrechung der Geheimhaltung auf internationaler Ebene; innerhalb der Sowjetunion war die Deklassifizierung schon im Dezember 1955 auf einer wissenschaftlichen Konferenz, im Februar 1956 auf dem 20.

³⁵ Vgl. die entsprechenden Zeitungsberichte vom 11.8.1955 in der SZ, dem Göttinger Tageblatt, der Göttinger Presse und der Welt; vgl. auch Gerwin, Kernfusion, S. 30-34.

³⁶ Angelopoulos, Atomenergie, S. 21f.

³⁷ Angelopoulos, Atomenergie, S. 64, der hier einen Artikel eines sowjetischen Professors zitiert.

³⁸ Der genaue Titel des Vortrags lautet "On the Possibility of Producing Thermonuclear Reactions in a Gas Discharge", vgl. den Bericht in atw, Juni 1956, S. 231.

³⁹ Vgl. atw, Juni 1956, S. 231; Teller, Peaceful Uses, S. 28; Bromberg, Fusion, S. 70; Gerwin, Kernfusion, S. 35-39.

Parteitag der KPdSU erfolgt.⁴⁰

In Folge des Vortrags Kurtschatows beschloß man auf einer amerikanisch-britischen Deklassifizierungskonferenz, die Geheimhaltung grundsätzlich aufzuheben. Kurz darauf entstand die Idee, dies im Rahmen einer internationalen Konferenz zu tun. Im Juli 1956 erschien in der "Review of Modern Physics" ein Artikel von Post zur Fusionsforschung, in der in größerem Umfang Forschungsergebnisse preisgegeben wurden.⁴¹ Im September 1956 entschied sich die Division of Research der AEC im Stimmenverhältnis von 3 zu 1 für die Aufhebung der Geheimhaltung mit Ausnahme der Pläne, die sich auf den Fusionsreaktor bezogen. Seit dem Herbst 1956 begann in einem Tauziehen der wissenschaftliche Austausch zwischen den USA und Großbritannien in einer Atmosphäre, die zwischen Zusammenarbeit und Rivalität schwankte. Im Juni 1957 war ein Deklassifizierungsleitfaden erarbeitet, den die AEC im November 1957 unterschrieb. Mittlerweile waren die militärischen Motive für die Geheimhaltung in den Hintergrund getreten: Über die Kernspaltungsreaktoren standen Neutronenquellen zur Verfügung; zudem ließ der damalige Stand der Fusionsforschung die baldige Nutzbarmachung von Tritium nicht erwarten. Auch waren im Zuge der Atoms for Peace-Politik die Forschungen auf dem Gebiet der Kernspaltung weitgehend deklassifiziert, so daß die Aufhebung der Geheimhaltung auch für die Fusionsforschung sich in diesen Trend einfügte.

2.2. Die 2. Genfer Atomkonferenz und die Folgen

In die Vorplanungen zur 2. Atomkonferenz bezog man die Fusionsforschung als möglichen Themenkreis ein. Bewegten sich diese Planungen zur Repräsentation der Fusionsforschung noch in einem normalen Bereich, so trug der "Sputnik-Schock" - die sowjetische Raumsonde Sputnik 1 umkreiste am 4.10.1957 als erster künstlicher Flugkörper die Erde, woraufhin die USA ihr Weltraum- und Forschungsförderungsprogramm stark forcierte - mit zu einer Wende bei. Während die Division of Research weiterhin ein beschränktes Ausstellungsprogramm für die Fusionsforschung einplante, das nur bei einem "breakthrough" in den Forschungen ausgeweitet werden sollte, trat der in besonderem Maße von nationalem Rivalitätsdenken geprägte Strauss mit Unterstützung des AEC-Kommissionsmitglieds Libby für die Durchführung eines Crash-Programms im Hinblick auf die Genfer Atomkonferenz ein. Durch Ausweitung von Personal und finanzieller Ausstattung und Konzentration aller

⁴⁰ Vgl. Eckert, Internationale Anstöße, S. 118.

⁴¹ Richard Post, Controlled Fusion Research - An Application of the Physics of High Temperature Plasmas, in: Reviews of Modern Physics, Bd. 28, 1956, S. 338-362.

Bemühungen sollte ein Durchbruch in der Fusionsforschung erreicht werden. Die stärkste Ausdehnung erfolgte im Zentrum Oak Ridge, wo die Fusionsforschung neuer Forschungsschwerpunkt wurde.⁴²

In England ging im Forschungszentrum Harwell 1957 das Experiment ZETA (Zero Energy Thermonuclear Assembly) in Betrieb, eine Anordnung des Typs des toroidalen stabilisierten Pinch. Noch am 30.8.57 entdeckte man bei einer geschätzten Temperatur von 5 Millionen Grad Kelvin einen hohen Neutronenausbruch, von dem man annahm, er sei thermonuklearen Ursprungs. Im Dezember 1957 ergaben Messungen an den US-Experimenten Perhasatron S-3 und Columbus S-4 ebenfalls Neutronenausbrüche.

Am 24.1.1958 wurden in offiziellen Erklärungen und in einem Sonderheft der Zeitschrift "Nature" Einzelheiten der englischen und amerikanischen Forschungen freigegeben und auch auf das ZETA-Experiment hingewiesen. Allerdings stellte man einschränkend fest, die Natur der Prozesse, aus denen die Neutronen stammten, sei noch nicht geklärt; vorsorglich bemerkte Strauss in seiner Erklärung, es seien "voraussichtlich Jahre intensiver Arbeit notwendig", ehe eine energieliefernde Versuchsanlage erreicht sei.⁴³ Im Februar 1958 veröffentlichte die renommierte amerikanische Zeitschrift "Physical Review" Berichte, die darauf schließen ließen, daß die Erfolgsmeldungen mit Skepsis zu betrachten seien, weitere Messungen führten dazu, daß die Neutronen nicht thermonuklearen Prozessen entstammten; die Erfolgsmeldung wurde für das ZETA-Experiment⁴⁴ und für die amerikanischen Experimente revidiert.

Zunehmend erkannte man, daß erst grundlegende Untersuchungen zum Plasmaverhalten und seinen zahlreichen Instabilitäten durchgeführt werden mußten.⁴⁵ Obwohl das ursprüngliche Ziel nicht erreicht war, einen energieliefernden Verschmelzungsprozeß in Gang zu setzen, wurde die werbewirksam aufgemachte Genfer Ausstellung ein voller Erfolg.⁴⁶ Die Geheimhaltung wurde am Vorabend der Konferenz offiziell aufgehoben; die Sowjetunion gab zwar keine derartige Erklärung ab, überreichte den Vereinten Nationen jedoch ein vierbändiges Werk mit mehr als 100 bis dato unveröffentlichten Arbeiten sowjetischer Wissenschaftler.⁴⁷ Die Amerikaner

⁴² Vgl. zur Entscheidung über das Crashprogramm Bromberg, Fusion, S. 77-80.

⁴³ Text der Erklärung von Strauss vor der AEC, 24.1.58, NL Heisenberg, BMat.

⁴⁴ Eine ausführliche Schilderung der Versuchsanordnung findet sich bei Gerwin, Kernfusion, S. 42-50; Bromberg geht ausführlicher auf die Forschungen ein, die zur Revision der Erfolgsmeldung führten, vgl. vor allem S. 82 und 86.

⁴⁵ "Too much enthusiasm, to great a pressure from newsmen and politicians, and too low standards of care in the new thermonuclear specialty had combined to betray them", Bromberg, Fusion, S. 86.

⁴⁶ Vgl. hierzu Eckert, Internationale Anstöße, S. 119.

⁴⁷ atw 10, 1958, S. 409.

flogen zehn originalgetreue bzw. originale Fusionsexperimente aus Princeton, Berkeley, Oak Ridge und Los Alamos ein. In der Sektion zur kontrollierten Kernfusion waren die USA durch 26 Vorträge, die Sowjetunion durch zwölf, die Engländer durch acht vertreten, neun kamen aus anderen Ländern. Auf der Hauptsitzung berichtete Alfvén für Schweden über die dortigen Forschungen zur Magnetohydrodynamik, Artsimovich über die Forschungen in der Sowjetunion, Biermann für Deutschland, Teller für die USA, Thonemann für England. Allein die Teilnahme Deutschlands an der Hauptsitzung weist darauf hin, daß auf diesem Gebiet der Forschungsstand hoch war.⁴⁸

Entsprechend dem Wandel in der Einschätzung des Standes der Fusionsforschung formulierte man die Erwartungen an die baldige Realisierbarkeit jetzt zurückhaltender. Alfvén betonte den Wert der Forschungsergebnisse allein vom Standpunkt der Grundlagenforschung aus, da die enge Kopplung der thermodynamischen Forschungen mit anderen Fragen der Astrophysik eine gegenseitige Befruchtung der Gebiete verspreche.⁴⁹ Artsimovich verwies darauf, daß die gegenwärtigen Forschungen nur der Annäherung an das Problem dienten, und stellte fest: "not a single one of these approaches has been explored to such an extent as to permit one to say that success is assured",⁵⁰ und ähnliche Aussagen finden sich bei anderen Forschern. Den größten Pessimismus legte ausgerechnet einer der Hauptinitiatoren der Fusionsforschung, Edward Teller, an den Tag mit der Bemerkung: "I think we are at a stage similar to the stage at which flying was about one hundred years ago".⁵¹ Unter Hinweis auf die zahlreichen Probleme, die der Realisierung im Wege standen, wobei er auch die radioaktive Strahlung, die den Fernbetrieb erforderlich machte, und den notwendigen zwischenzeitlichen Austausch der Reaktormaterialien aufgrund von Strahlungsschäden und Korrosion nannte, kam er zu dem Schluß: "These and other difficulties are likely to make the released energy so costly that an economic exploitation of controlled thermonuclear reactions may not turn out to be possible before the end of the 20th century"; zugleich wies er unter dem Titel "Pflugscharen" auf zivile Anwendungsmöglichkeiten der unkontrollierten Fusion für Bergbau und "geographical engineering" hin.⁵²

Die Ernüchterung vermochte nichts daran zu ändern, daß die Fusionsforschung aufgrund der leichten Erhältlichkeit des einen Ausgangsstoffes Deuterium und des gegenüber Spaltreaktoren voraussichtlich geringeren Gefährdungspotentials als

⁴⁸ Die einzelnen eingereichten Papiere sind abgedruckt im Band 31 der Proceedings of the Second United Nations International Conference.

⁴⁹ Vgl. Alfvén, Magnetohydrodynamics, S. 3.

⁵⁰ Artsimovich, Research, S. 6.

⁵¹ Teller, Peaceful Uses, S. 32.

⁵² Ebenda.

Ziel erhalten blieb und nach der Genfer Konferenz die Forschungen sogar noch verstärkt wurden. Langfristig nahm man den Fusionsreaktor als dritte Generation nach Spalt- und Brutreaktoren in Aussicht.⁵³

Das Jahr 1958 mit der Aufhebung der Geheimhaltung war für die Ausrichtung der Fusionsforschung entscheidend. Zwei Entwicklungsstränge trafen aufeinander: Zum einen das Zurückschrauben der hochgesteckten Erwartungen und eine verstärkte Hinwendung zur Grundlagenforschung. Zugleich gab die Genfer Konferenz den Anstoß zur Ausweitung bzw. Neuaufnahme der Forschungen in den einzelnen Ländern.

Die Wissenschaftler am MPIPA waren sich über die nötige Umorientierung einig: "Die Ergebnisse der in Genf veröffentlichten Experimente zeigen, daß man noch sehr weit davon entfernt ist, das Verhalten eines Plasmas bei den für die Fusion notwendigen Dichten und Temperaturen zu verstehen. Damit ergab sich zwangsläufig eine Verschiebung des Zieles. War in Genf noch das wesentliche Ziel, Experimente zu machen, bei denen möglichst viel Neutronen entstehen, die darauf schließen lassen, daß bei dem Experiment möglichst viele thermonukleare Umwandlungen stattgefunden haben, so versucht man jetzt mehr solche Experimente anzustellen, bei denen man unabhängig von den Problemen der Fusion das Verhalten eines Plasmas bei hohen Temperaturen studieren kann. Man ist gegenwärtig der Ansicht, daß die Theorie erst mit einfachen Experimenten in Einklang gebracht werden muß, indem man an den Experimenten lernt, welche Vernachlässigung der Theorien erlaubt sind und welche nicht. Nur wenn man so langsam zu immer komplizierteren Experimenten fortschreitet, besteht die Aussicht, daß die theoretische Interpretation mit den Experimenten Schritt hält und daß man dann in der Lage sein wird, die Vorgänge in den bisher für die Fusion vorgeschlagenen Maschinen zu verstehen, denen der Theoretiker heute noch ziemlich ratlos gegenübersteht".⁵⁴ Diese Einstellung bestätigte sich auf nachfolgenden Konferenzen wie die vom 17.-21.8.1959 in Uppsala veranstaltete internationale Konferenz über Plasmaphysik und in Diskussionen der bei CERN angesiedelten Study Group on Fusion.⁵⁵ Dahinter stand die Erfahrung, daß das Plasma sehr viel kompliziertere Verhaltensweisen aufwies, als die Theorie erwarten ließ, und die Instabilität eine der größten Herausforderungen darstellte. Thonemann verwendete auf der 2. Genfer Atomkonferenz folgendes Bild: "Trying to stabilize a plasma against these deformations is rather like trying to balance a ball on the end of a stick".⁵⁶

Die Bedingungen, unter denen die Fusionsforschung nach der 2. Genfer Atom-

⁵³ Vgl. Radkau, Atomwirtschaft, S. 70.

⁵⁴ Hagenow/Kippenhahn, Fusion, S. 518.

⁵⁵ Vgl. den Bericht in atw, Dezember 1959, S. 516.

⁵⁶ Thonemann, Thermonuclear Research, S. 36.

konferenz erfolgte, hatten sich jedoch grundlegend verändert: Der freie wissenschaftliche Austausch war gewährleistet und die Fusionsforschung rückte in den Status eines normalen Forschungsprogramms. Im September 1959 unterzeichneten die USA und die Sowjetunion ein Abkommen zum Wissenschaftleraustausch. In Nachfolge der Genfer Konferenz veranstaltete die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), deren Gründung am 4.12.1954 von der UNO-Vollversammlung beschlossen wurde und deren Aufgabe die Förderung der weltweiten Zusammenarbeit auf dem Gebiet der zivilen Nutzung der Kernenergie ist,⁵⁷ internationale Treffen über Fusionsforschung, das erste 1961 in Salzburg. Die Fusionstagungen der IAEO blieben über das nächste Jahrzehnt hinweg der wichtigste Begegnungsraum der internationalen fusion community. 1960 rief die IAEO die Zeitschrift "Nuclear Fusion" ins Leben, die in englischer, französischer, russischer und spanischer Sprache erschien. Die Fusionsforschung entwickelte sich zu einer eigenen Disziplin mit Fachzeitschriften und Fachtagungen.⁵⁸

Rückblickend läßt sich feststellen, daß am Anfang der Forschungen zur kontrollierten Kernfusion die Initiative einzelner Wissenschaftler stand. Für die USA spricht Bromberg von dem "grass-roots enthusiasm initiated by working scientists connected with the national laboratories",⁵⁹ eine Bemerkung, die sich ohne weiteres auf England übertragen läßt. Das Vorhaben stellt eine außerordentliche wissenschaftliche Herausforderung dar; hinzu kam die Hoffnung auf die Nutzbarmachung als Energiequelle. Meist erfolgten die Forschungen in den Anfängen im Zusammenhang mit militärischer Forschung. Die Vorreiter der amerikanischen Fusionsforschung befaßten sich hauptsächlich mit der Entwicklung hydrogener Waffen, und die möglichen militärischen Anwendungsmöglichkeiten spielten die entscheidende Rolle für die Geheimhaltung der Forschungen zu einem Zeitpunkt, als für die Entwicklung der Kernspaltungsenergie die Geheimhaltung schon weitgehend aufgehoben war.⁶⁰ In einem Land wie Schweden, das nicht in die Atombombenentwicklung involviert war, gingen die Forschungen aus astrophysikalischen Fragestellungen hervor und waren überwiegend grundlagenorientiert,⁶¹ und ein ähnliches Bild ergibt sich für

⁵⁷ Die Satzung der IAEO trat am 29.7.1957 in Kraft; 1959 hatte die IAEO bereits 70 Mitgliedstaaten; vgl. Buße/Grumbach, Staat und Atomindustrie, S. 83.

⁵⁸ Vgl. zu den Wirkungen der Genfer Konferenz auf das amerikanische Fusionsprogramm Bromberg, Fusion, S. 93-100.

⁵⁹ Bromberg, Fusion, S. 31f.

⁶⁰ "A most pervasive stimulus for the fusion program was American weapons research", Bromberg, Fusion, S. 32.

⁶¹ Vgl. den Vortrag Alfvéns auf der 2. Genfer Atomkonferenz. Alfvén betonte den Vorrang der Grundlagenforschung: "We have chosen this line of research because we believe that the way

die deutschen Forschungen auf diesem Gebiet. Die sprunghafte Ausweitung der amerikanischen Fusionsforschung wäre ohne den Hintergrund des forschungspolitischen Wetttrüstens zur Zeit des Kalten Krieges und ohne den Einfluß von Lewis Strauss in der stattgefundenen Dimension kaum denkbar gewesen. Die militärischen Nutzungsmöglichkeiten der Fusion und die sich daraus ergebende Geheimhaltung, die den freien wissenschaftlichen Austausch und damit vielleicht auch eine realistische Einschätzung des Standes der Fusionsforschung verhinderte, der generelle Glaube an die technische Machbarkeit, dadurch genährt, daß der Zeitraum zwischen Entdeckung der Kernspaltung und ihrer Anwendung nur kurz war, ließen erhöhte Überwartungen an die Realisierbarkeit und den Zeitraum bis zur Realisierung entstehen. Die Aufhebung der Geheimhaltung schuf die Voraussetzung zur Korrektur dieser Blickrichtung.

1958 waren die grundlegenden Versuchsanordnungen, die für die nächsten Jahre Gegenstand der Forschung wurden, im Prinzip bekannt. In England lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung des stabilisierten toroidalen Pinch. In den USA erforschte man auch innerhalb der einzelnen Zentren verschiedene Typen, dennoch hatte sich seit den Anfängen eine gewisse Arbeitsteilung herausgebildet; in Livermore konzentrierte man sich auf die Entwicklung der Spiegelmaschinen, in Los Alamos auf Pinch-Anordnungen, in Princeton auf die Stellaratorentwicklung. In Oak Ridge entwickelte man eine abgewandelte Form der Spiegelmaschinen, wobei in ein heißes Gas hochenergetische Ionen eingeschossen, im Magnetfeld eingefangen werden und das Restgas ionisieren.⁶² In Frankreich und Schweden untersuchte man überwiegend Pinch-Experimente, in Rußland vor allem, wie im Kurtschatowvortrag geschildert, Pinch, Spiegelmaschinen und das Tokamakmodell.⁶³

Organisatorisch waren die Voraussetzungen zur Durchführung experimenteller Forschung im großen Stil durch den Ausbau der Forschungszentren im Zuge der Atombombenentwicklungen geschaffen. Für die Zentren, bei denen nach der Entwicklung der Atombombe Kapazitäten frei wurden, stellten sich mit der Entwicklung hydrogener Waffen und dann der zivilen Nutzung der kontrollierten Fusionsenergie neue Forschungsaufgaben. Im Zuge der Diversifizierungsproblematik hatte die Fusionsforschung, wie gerade die Entwicklung des Zentrums Oak Ridge zeigt, die Funktion, freiwerdende Forschungskapazitäten zu füllen. Ihrer Struktur nach paßte die Fusionsforschung, vor allem in der Phase der Großexperimente,

to solve the thermonuclear problem should be by an advance on a broad front in magnetohydrodynamics, plasmaphysics and astrophysics", Alfvén, Magnetohydrodynamics, S. 5.

⁶² Ein Überblick zu den verschiedenen Experimenten findet sich bei Lüst, Fusion, S. 419-422.

⁶³ Schon in Genf stellte die UdSSR ein Tokamakmodell aus und gab erste Ergebnisse bekannt, die Vorzüge stellten sich aber erst nach einem Jahrzehnt zäher Forschungsarbeit von Artsimovich, der unbeirrt am Tokamakprinzip festhielt, heraus; Schriftliche Bemerkungen von Gierkes, S. 10.

gut in den Bereich der Großforschung hinein: Sie war teuer und verlangte aufwendige Apparaturen. Sie vereinigte Teildisziplinen der Physik und forderte die Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen wie Physik, Mathematik, Informatik. Sie verlangte die Kooperation von theoretischer und experimenteller Forschung. Sie war projektorientiert, ausgerichtet auf das Fernziel Fusionsreaktor. War in den angelsächsischen Ländern und in der UdSSR die Fusionsforschung bereits in den Bereich der Großforschung vorgestoßen, so stellte sich im Zuge der 2. Genfer Atomkonferenz für die europäischen Länder die Frage, inwieweit sie in diese Richtung mitgehen wollten.