

In: Festschrift „50 Jahre Plasmaphysik und Fusionsforschung in Innsbruck“, A. Kendl (Hrsg.), Innsbruck University Press, 2008

1958 - 2008: 50 Jahre Fusionsforschung für den Frieden

Karl Lackner

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM-Assoziation
D-85748 Garching

Die Idee – wie es in der Sonne geschieht – die Fusion zweier leichter Atomkerne zur Energiegewinnung zu nutzen, tauchte schon in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts auf. Im Gegensatz zur Kernspaltung breitet sich Kernfusion nicht wie eine Kettenreaktion, sondern wie ein Brenn- oder Detonationsprozess aus, sehr ähnlich einer chemischen Reaktion, nur mit Brenntemperaturen im Bereich von hundert Millionen – statt einiger hunderte – Grad, und einer pro Reaktion freigesetzten Energie im MeV- statt im eV-Bereich. Anders als bei der Kernspaltung erwies sich daher die kontrollierte Nutzung viel schwieriger als der Bau einer Bombe. Das Versprechen praktisch unbegrenzter Brennstoffressourcen und die Abwesenheit radioaktiver Reaktionsprodukte stellten jedoch eine noch immer gültige, ausreichende Motivation dar, diese Herausforderung anzunehmen.

Zwei grundlegende Konzepte zur möglichen friedlichen Nutzung dieser Reaktion kristallisierten sich bald heraus: die Miniaturisierung der „Wasserstoffbombe“ zu einem kleinen Kügelchen, das durch Kompression zu einer Miniexplosion gebracht wird, und der stationäre Einschluss eines heißen Plasmas durch passend geformte Magnetfelder. Aus der ersten Idee entwickelte sich das Konzept der Trägheitsfusion, bei der geballte Laser- oder Teilchenstrahlenergie zur Verdichtung und zum Aufheizen eines Deuterium-Tritium-Pellets benutzt wird. Die zweite Linie führte zur Entwicklung der toroidalen magnetischen Einschlusskonfigurationen, als deren vorläufige Krönung das in Cadarache am Beginn des Aufbaus stehende ITER-Projekt zu sehen ist. Wie in der ganzen Welt konzentrierte sich die Forschung zur zivilen Nutzung der Kernverschmelzung auch in Innsbruck überwiegend auf den magnetischen Einschluss.

Ein Magnetfeld hemmt zunächst nur die Beweglichkeit von Teilchen senkrecht zu seinen Feldlinien. Will man damit den Druck eines heißen Plasmas kompensieren und die Energieverluste durch Wärmeleitung um die nötigen mehr als zehn Größenordnungen reduzieren, muss man die Magnetfeldlinien entweder auf geschlossenen Flächen zwingen, oder den so genannten Spiegel-Effekt nutzen, der bewirkt, dass die Bewegung von Teilchen

entlang Feldlinien in Richtung zunehmender Feldstärke gehemmt wird. Das Plasma muss auch zunächst durch äußere Heizung auf eine entsprechende Brenntemperatur gebracht werden, da erst bei ca. 100 Millionen Grad die Selbstheizung durch energetische Reaktionsprodukte die Aufrechterhaltung der Temperatur übernehmen kann. Sehr bald zeigte sich auch, dass der magnetische Einschluss ernsthaft mit dem Problem der Plasmaverunreinigungen zu kämpfen hat. Die Leistungsdichte in einem Fusionsreaktor ist nämlich gering – ca. 1/100 der in einem Automotor oder einem Spaltreaktor – und selbst geringe Anteile nicht voll-ionisierter Atome führen zu elektromagnetischen Strahlungsverlusten, die ein schnelles Erlöschen der Entladung bedeuten könnten. Da die Plasmateilchen mehr als 10 KeV und die bei der Reaktion entstehenden Helium-Ionen (α -Teilchen) sogar 3,5 MeV Energie besitzen, besteht die Gefahr der Zerstäubung an Oberflächen und des Eindringens von Wandmaterial in das Plasma.

Das Studium der Kernfusion zur Energiegewinnung begann in den 50er Jahren vor allem in den USA, Russland und Großbritannien, und wurde bis 1958 weitgehend geheim betrieben. Bei der Genfer Konferenz zur friedlichen Nutzung der Kernenergie legten die Teilnehmer aus diesen Staaten jedoch ihre Ergebnisse offen, und auch Deutschland, Italien und Frankreich berichteten über theoretische und experimentelle Untersuchungen. Es gab eine Reihe von Konfigurationen, die im Prinzip Plasmaeinschluss versprachen, doch zeigten sich erst langsam Schritt auf Schritt die grundlegenden Schwierigkeiten: In sich geschlossene Feldlinien müssen topologisch ineinander verschachtelte Tori bilden, aber Konsequenzen der Abweichungen von der Idealform werden erst bei ausreichend hohen Temperaturen sichtbar. Magnetische Spiegelfelder bremsen nicht jene Teilchen die sich fast parallel zu Feldlinien bewegen. Das einfache Bild, nach dem Teilchen sehr eng (innerhalb eines Gyrationkreises) an eine bestimmte Feldlinie gebunden sind, stimmt nur in homogenen Feldern: Inhomogenitäten, wie sie in toroidaler Geometrie unvermeidbar sind, führen zu teilweise sehr komplexen Driftbahnen. Erst die leistungsfähigen Großrechner der 80er Jahre erlaubten es, Feldkonfigurationen zu bestimmen, in denen Teilchen in einem endlichen Gebiet eingeschlossen blieben. Relativ einfach zu analysieren waren nur die strikt axisymmetrischen Konfigurationen, die wir heute unter den Namen Tokamak und toroidale Pinche kennen. Die aber wahrscheinlich traumatischste Erfahrung war die Erkenntnis, dass nur wenige der möglichen Gleichgewichtskonfigurationen auch stabil sind.

Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser frühen Forschungsperiode war 1958 die Formulierung des Energieprinzips für die magnetohydrodynamische Stabilität, das allerdings seinen vollen Nutzen erst durch die Entwicklung numerischer Methoden und die Verfügbarkeit ausreichend leistungsfähiger Rechner in den 70er Jahren zeigte. Selbst dieses Energieprinzip macht jedoch die Annahme, dass Magnetfelder in das Plasma eingefroren sind. Langsamere Instabilitäten, bei denen diese Annahme nicht mehr gerechtfertigt ist, können

selbst dann noch auftreten, wenn dieses Kriterium erfüllt ist. Die Zeit bis zur Genfer Konferenz und das Jahrzehnt danach waren daher geprägt von eher bitteren experimentellen Erfahrungen. Einfache lineare Konfigurationen, bei denen das Plasma notwendigerweise an den Enden in Kontakt mit materiellen Wänden steht, zeigten zwar ein theoretisch einigermaßen verständliches Verhalten, waren jedoch als Modell eines Fusionsreaktors eine Totgeburt, da sie mehrere Kilometer lang sein müssten, um die Endverluste in Grenzen zu halten. Versuchte man die Enden in der Form magnetischer Spiegel zu verschließen, blieben die Verluste trotzdem groß, und es begannen Instabilitäten aufzutreten.

Es lag daher nahe, die linearen Plasmasäulen, die je nach der Richtung des Magnetfeldes Theta-, Z- oder „screw“-Pinch genannt wurden, zu einem Torus zu biegen. Dabei folgt schon aus einer einfachen Gleichgewichtsbedingung, dass ein reiner Theta-Pinch nicht möglich war, und ein reiner Z-Pinch war schon in gerader Anordnung instabil. Grosse Hoffnung setzte man in eine Mischung der beiden Feldkomponenten, die tatsächlich in einem frühen Großexperiment „Zeta“ in Culham verwirklicht wurde. Es zeigte ein anfänglich virulent instabiles Verhalten und wurde – teils zu Unrecht – als dramatischer Misserfolg gewertet. Erst später, als der neue Hoffnungsträger bereits der Tokamak war, begann man dieses Verhalten zu verstehen: Zwar war die anfangs durch den Aufbau der Entladung aufgeprägte Magnetfeldform tatsächlich stark instabil, doch führte diese Instabilität dann in einer dynamischen Selbstorganisation zur Ausbildung einer neuen „reversed field pinch“ genannten Konfiguration, die viel bessere Stabilitätseigenschaften hatte. Das schnelle, vernichtende Urteil über diese Anlage kam einfach von den zu hoch gesteckten Erwartungen.

Es gab einen weiteren Weg, topologisch toroidale Flussflächen zu produzieren, jedoch unter Aufgabe der Axisymmetrie – den von Lyman Spitzer erfundenen Stellarator. Eigentlich war auch dieses Konzept, in der damaligen Form, nicht echt lebensfähig. Die Aufgabe der Axisymmetrie ändert nämlich qualitativ die Natur der Driftbahnen der Teilchen, so dass sie nicht immer in einem endlichen Gebiet eingeschlossen bleiben und zumindest teilweise verloren gehen. Dies wurde allerdings erst später völlig klar erkannt, und noch später wurde dann sogar ein Heilmittel gefunden. In den 60ern aber krankte der Stellarator daran, dass er sehr sensibel gegen Feldfehler war, und dass das entlang dieser Linie in Princeton gebaute Großexperiment – der C-Stellarator – ähnlich wie Zeta die gesetzten Erwartungen dramatisch verfehlte.

So schien die Fusionsforschung gegen Ende der 60er Jahre einer Götterdämmerung zuzusteuern. Einige Einschlusskonzepte waren in sehr großen Anlagen realisiert worden und hatten die Erwartungen bitter enttäuscht. Die Geschichte der Fusion zeigt Analogien zu Darwins Theorie von der *Entstehung der Arten*, und Ende der 60er war der Zeitpunkt des Dinosauriersterbens. Es wäre auch das Ende der Fusionsforschung gewesen,

wenn nicht in der damaligen Sowjetunion ein paar kleine Säugetiere kräftige Zeichen von Lebensfähigkeit gezeigt hätten. Sie hießen Tokamaks, und ihre weitere Genealogie ist in Abbildung 1 illustriert. Ein Tokamak ist eigentlich – geometrisch – ein Verwandter von Zeta, nur stehen die toroidalen und poloidalen Feldkomponenten in einem anderen Größenverhältnis. Die toroidale Feldkomponente ist viel größer, und da das Konzept von vorneherein in dem Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfelddruck (genannt β : eine ganz zentrale Kenngröße des magnetischen Einschlusses) auf wenige Prozent begrenzt ist, erschien auch dieses Konzept vor der Entwicklung leistungsfähiger Supraleiter als hoffnungslos. (Tatsächlich hatte der deutsche Fusionspionier Arnulf Schlüter dieses Einschlussprinzip auch unabhängig bereits beschrieben, aber wegen des zu geringen erreichbaren β -Wertes verworfen). Im Jahr 1968 berichteten Wissenschaftler aus der Sowjetunion in einer Konferenz in Nowosibirsk jedoch über sensationelle erreichte Temperaturwerte (im 10 Millionen Grad-Bereich) und damit begann nicht nur die Erfolgsgeschichte des Tokamaks, sondern auch eine Tradition der engen Zusammenarbeit der Fusionsforscher über den eisernen Vorhang hinweg. Eine Gruppe Culhamer Wissenschaftler reiste mit einer Laserapparatur an das Kurchatov-Institut und verifizierte mit der damals neuen Methode der Thomson-Streuung die Temperaturschätzungen der sowjetischen Kollegen.

Abbildung 1 zeigt wie sich diese neue Spezies ausbreitete, wuchs, mutierte, und in der erfolgreichsten Mutationsform einmal ITER werden wird. Überall begann der Bau größerer Tokamaks, in den USA wurde zur Beschleunigung des Prozesses sogar schnell einmal der C-Stellarator umgebaut. Zwei Entwicklungen aber fielen aus diesem Schema des einfachen linearen Wachstums heraus. Wenn man die Aussagen der Stabilitätskriterien ernst nimmt, sollten Tori mit einer in vertikaler Richtung elongierten Querschnittsform (D-Form) höhere β -Werte erreichen können. Diese theoretische Aussage war bekannt, aber der Mut nach ihr zu handeln, war unterschiedlich verteilt. Die Sowjetunion, begrenzt in den finanziellen Mitteln, baute eine kleine Anlage (Fingerring: T9). In den USA wurde ebenfalls eine etwas größere, auf diesem Prinzip basierende Anlage (ISX-B) errichtet, während für das Flaggschiff der amerikanischen Forschung, TFTR, ein konventioneller kreisförmiger Querschnitt vorgesehen blieb. Europa plante, neben mehreren kleineren Anlagen ebenfalls ein Großexperiment, das wie TFTR einen Betrieb mit Tritium und daher signifikante thermonukleare Energieproduktion zulassen sollte. Hier vertraute man jedoch der Theorie und stützte die Pläne auf einen D-förmigen Plasmaquerschnitt.

Das zweite, qualitativ neue Element betraf den Divertor. Wie erwähnt stellen Verunreinigungen, die beim Kontakt der Wand mit dem heißen Plasma entstehen, eine Bedrohung für jedes Plasmaexperiment dar. Durch eine spezielle Magnetfeldform mit einer Separatrix kann man diesen Wand-Plasma-Kontakt und die damit verbundene Verunreinigungsquelle jedoch in eine getrennte Kammer verschieben, und dies bot Hoffnung, das Plasma sauber halten zu

können. Die Idee war bereits an einem Stellarator getestet worden, erwies sich dort aber als zu erfolgreich: nicht nur die Verunreinigungen, sondern das ganze Plasma verschwanden in Rekordzeit aus dem magnetischen Gefängnis. Da in einem Tokamak ein Divertor jedoch unter Beibehaltung der Axisymmetrie konstruiert werden kann, waren die Vorzeichen hier günstiger, und man entschloss sich in Europa und in den USA zum Bau von zwei mittelgroßen Anlage, die ASDEX (Axisymmetrisches Divertor-Experiment) bzw. PDX (Poloidal Divertor Experiment) genannt wurden.

Die amerikanischen Kollegen hatten gleich vier Divertoren an den Ecken eines kissenförmigen Plasmaquerschnitts vorgesehen, während ASDEX in Garching ein fast kreisförmiges Plasma mit ohrenförmigen Auswüchsen am unteren und oberen Ende produzieren sollte. Dieses Plasma war viel einfacher zu kontrollieren und so wurde an ihm die wahrscheinlich wichtigste Entdeckung der Tokamakforschung gemacht: die Existenz einer Bifurkation im Wärmetransport, die bei ausreichend hoher Heizleistung einen zweiten Zweig im Energieeinschlussverhalten – das so genannte H-Regime – zulässt. Die praktischen Konsequenzen dieser Entdeckung waren dramatisch, da sich – bei konstanter Heizung des Plasmas – dessen Energieinhalt plötzlich verdoppelte. Obwohl unmittelbar klar war, dass dieses Phänomen auf der Unterdrückung der Turbulenz in einer dünnen Schicht in der Nähe des Plasmarandes beruht, und es starke Hinweise gibt, dass dies durch die Wirkung einer verscherten Strömung im Plasma geschieht, gibt es bis heute kein ab-initio Modell zu seiner Erklärung. Seine praktische Bedeutung aber war sofort klar, und da das H-Regime in Divertortokamaks ein sehr robustes Phänomen ist, änderte seine Entdeckung grundlegend den weiteren Verlauf der Fusionsforschung. Alle ab diesem Zeitpunkt geplanten Tokamaks hatten einen Divertor, und existierende bzw. im Bau befindliche Anlagen (JT-60 in Japan, JET) wurden bei erster Gelegenheit auf diese Geometrie umgebaut. JET (wie das kleinere amerikanische Experiment Doublet III, später umgebaut zu DIII-D) hatte die besonderen Vorteile eines großen Plasmavolumens und eines flexiblen Magnetfeldes, die ihm bereits vor den entsprechenden Umbauten einen Separatrix-begrenzten Betrieb mit Zugang zum H-Regime erlaubten.

Besonders bedeutend war jedoch, dass alle diese qualitativen Verbesserungen des Tokamakkonzepts miteinander kombinierbar waren. Ein Divertortokamak konnte auch mit einem stark elongierten Plasmaquerschnitt betrieben werden, und bringt – neben dem unverhofften Zugang zum H-Regime – auch eine signifikante Reduktion der Verunreinigung des Plasmas. Um die für die Fusionsreaktionen nötigen Temperaturen von mehr als 10 keV (entsprechend > 100 Millionen $^{\circ}\text{K}$) zu erreichen, musste man auch passende Heizmethoden entwickeln, und auch dies gelang sehr erfolgreich durch die Einstrahlung oder Anregung elektromagnetischer Wellen im Plasma in verschiedenen Frequenzbereichen (zwischen zig MHz bis zu mehr als 100 GHz) oder dem Einschuss hochenergetischer Neutralteilchen. Sogar ein Weg zur Bekämpfung des prinzipiellen Handicaps des Tokamaks wurde entwickelt: er benötigt

nämlich zur Erzeugung geschlossener magnetischer Flussflächen einen toroidalen Plamastrom, der nur für einen begrenzten Zeitraum durch Induktion über eine Transformatorspule getrieben werden kann. Ein derartiger Strom kann jedoch auch durch gezielten Impulsübertrag auf Elektronen oder Ionen getrieben werden, erfordert dann aber beträchtliche Leistung in Form elektromagnetischer Wellen oder Teilchenstrahlen. Andere Beiträge des Magnetfeldes werden durch äußere Spulen erzeugt. In einem Reaktor müssen diese supraleitend sein, um Widerstandsverluste (die bei normal leitenden Spulen leicht die Fusionsleistung übersteigen könnten) zu eliminieren. Auch diese Technologie wurde bereits in den 80er Jahren an Tokamaks erprobt – an einem kleinen japanischen Experiment und einem großen europäischen (Tore Supra, in Cadarache/Frankreich).

Die Kombination aller dieser physikalischen und technologischen Fortschritte bot die Basis, um einen Testreaktor konkret zu planen. Bereit anfangs der 80er Jahre war ein derartiges Unternehmen unter der Ägide der IAEA, mit dem Namen Intor, gestartet, aber eher in der Form einer Konzeptstudie, ohne konkrete Pläne zur Realisierung. Eine glückliche politische Konstellation – Ost-West-Tauwetter war ausgebrochen und Fusionsforschung war, wie oben erwähnt, immer schon ein Pionier internationaler Zusammenarbeit – änderte dies aber grundlegend. So begann 1988 in mehreren Schritten die detaillierte Planung eines Experimentalreaktors – ITER – in Zusammenarbeit der Europäischen Union, Japans, der USA und der damaligen UdSSR (bzw. in ihrer Nachfolge Russlands). Die Eckpfeiler des Entwurfes standen fest: Divertor, D-förmiger Plasmaquerschnitt und supraleitende Spulen. Als Ziel wurde „Zündung“ anvisiert: Nach dem Aufheizen sollte keine weitere Energiezufuhr an das Plasma nötig sein, um die Brenntemperatur aufrecht zu erhalten. Der immer zitierte Vervielfältigungsfaktor der Leistung ($Q = \text{Fusionsleistung} / \text{externe Plasmaheizung}$) würde damit nominell gegen unendlich gehen. Tatsächlich wird dies auch in einem Tokamak-Kraftwerk nie wirklich der Fall sein, da schon zur Regelung des Brennvorganges, aber vor allem zum Aufrechterhalten des Plasmastromes immer eine Wellen- oder Teilchenenergiezufuhr nötig sein wird, so dass $Q = 25 - 40$ eher typische Zieldaten für Reaktorentwürfe sind. ITER sollte aber ein Experiment und nicht der Prototyp eines Kraftwerkes werden, so dass weder ein echter Dauerbetrieb noch Stromproduktion vorgesehen waren.

Dass ITER aber von Anfang an nicht eine abstrakte Studie sondern ein konkretes Bauvorhaben war, illustriert auch die Tatsache, dass über 400 Millionen Euro für die Fertigung von Prototypen kritischer Komponenten aufgewandt wurden. Dabei kam auch ein starker österreichischer – sogar spezifisch Tiroler – Akzent auf, da die Firma Plansee eine weltweite Führungsposition auf dem Gebiet thermisch hochbelastbarer Werkstoffe und Komponenten einnimmt, und dieser Aspekt bei ITER die größte technologische Herausforderung darstellt.

Nach 10 Jahren Planung lagen die Blaupausen von ITER weitgehend bereit, aber es wurde auch klar, dass die abgeschätzten Baukosten von ungefähr 6 Milliarden Dollar (1998-Standard) den Partnern für eine reine Forschungsanlage zu teuer erschienen. Die Vereinigten Staaten stiegen 1999 völlig aus dem Projekt aus und Europa, Japan und Russland beschlossen die Ausarbeitung einer weniger ambitionösen Anlage. Der Zielwert von Q wurde auf 10 reduziert, was ein physikalisch sinnvolles Ziel darstellt, da $1/5$ der Fusionsleistung (die in Form energiereicher Helium-Ionen anfällt) direkt zur Plasmaheizung dient, so dass bei $Q=10$ die intrinsische Heizung die noch nötige Zusatzheizung um einen Faktor 2 übertrifft. Dieses abgeänderte Projekt fand nicht nur die Billigung der Projektanten, sondern bewog auch die Vereinigten Staaten, wieder ins Team zurückzukehren. Wenig später schlossen sich die drei wirtschaftlich stärksten Staaten Asiens (Koreanische Republik, China und Indien) als neue Partner dem Unternehmen an. Blieb noch die schwierigste Entscheidung – über den Standort – die schließlich auf das Umfeld des wohl etablierten Kernforschungszentrums Cadarache in Frankreich fiel. Im Oktober 2007 trat der ITER-Staatsvertrag in Kraft und die konkrete Phase des umweltbehördlichen Genehmigungsverfahrens für den Bau begann.

Parallel zu dieser ITER-Planung waren natürlich auch die experimentelle und theoretische Plasmaforschung weiter fortgeschritten. Da das in einem Reaktor benötigte Wasserstoffisotop Tritium radioaktiv ist und sein Einsatz nur Sinn hat, wenn von Fusionsreaktionen auch ein signifikanter Beitrag zur Plasmaheizung zu erwarten ist, waren kleinere und mittelgroße Einschlussexperimente von vorneherein auf den Betrieb mit einfachem Wasserstoff („Protonium“) oder Deuterium beschränkt geblieben. JET und TFTR jedoch waren für einen radioaktiven Betrieb gerüstet und produzierten, beginnend 1991, abwechselnd Rekorde in Fusionsleistung (JET 1991: 1,7MW, TFTR 1994: 10,7 MW, JET 1997: 16 MW), produzierter Energie und Q ($= 0,65$; JET 1997). Diese Experimente brachten auch ein neues physikalisches Problem ins Rampenlicht. Die Selbstheizung durch Kernfusion erfolgt nämlich durch Reaktionsprodukte, die bei Entstehung eine Geschwindigkeit besitzen, die über der Ausbreitungsgeschwindigkeit niederfrequenter Plasmawellen liegt. Während ihrer Abbremsung können sie daher in resonantem Energieaustausch Instabilitäten anregen, die sie aus dem Magnetkäfig auswerfen könnten, bevor sie mit ihrer gesamten Energie zur Plasmaheizung beigetragen haben. Eine endgültige Antwort auf die Frage, unter welchen Bedingungen diese Instabilitäten eine ausreichende Selbstheizung des Plasmas verhindern würden, kann aber erst ITER geben, und dies stellt daher auch sein wichtigstes physikalisches Untersuchungsziel dar.

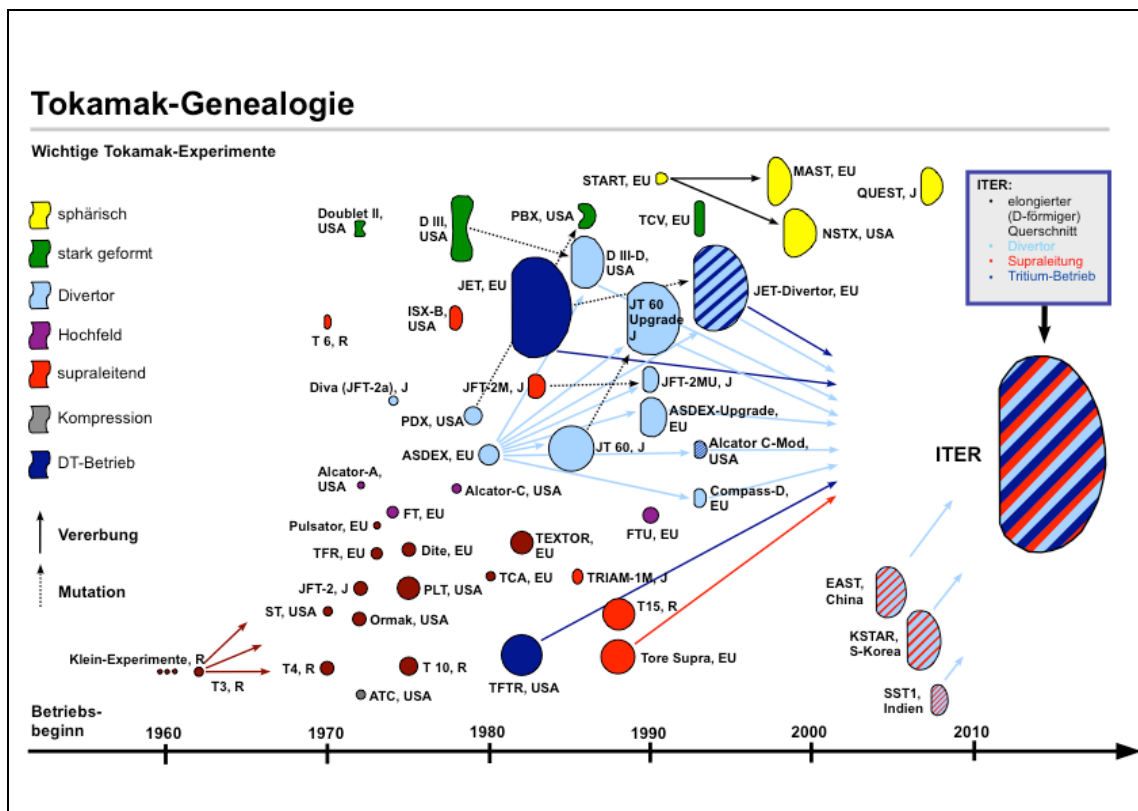
Der Tokamak besticht durch seine geometrische Einfachheit und hat daher auch einen großen Entwicklungsvorsprung vor anderen ernsthaft als Alternative diskutierten Konfigurationen. Ein Stellarator, mit einer viel komplexeren Geometrie, kann jedoch geschlossene Flussflächen ohne einen toroidalen Plasmastrom erzeugen und wäre daher auch ohne aufwendigen Stromtrieb durch Wellen- oder Teilcheninjektion stationär betriebsfähig. Mit der Aufgabe der

Axisymmetrie verliert man jedoch einen Erhaltungssatz der analytischen Mechanik, der (in Abwesenheit von Stößen und turbulenten Fluktuationen) jenen Einschluss energiereicher Teilchen garantiert, ohne den ein Fusionsreaktor undenkbar ist. Alan Boozer und Jürgen Nührenberg aber gelang es Anfang der 80er Jahre zu zeigen, dass unter bestimmten Bedingungen – in so genannten quasisymmetrischen Anordnungen – auch allgemein dreidimensionale Magnetfeldkonfigurationen einen dem Tokamak vergleichbaren Einschluss von Einzelteilchen besitzen können. Die tatsächliche Identifizierung derartiger Konfigurationen war eine Pioniertat der computergestützten Physik und brachte den Stellarator – wenn auch mit ein paar Runden Rückstand – wieder ins Rennen. Ein nach diesen Kriterien entworfenes Großexperiment – Wendelstein 7-X – ist gegenwärtig in Greifswald (Deutschland) in Bau und wird 2014 in Betrieb gehen.

Außer im Zusammenhang mit dem Stellarator wurde hier bisher wenig über Theorie gesagt. Sie spielte aber natürlich eine große Rolle in der Darwinschen Selektion der Einschlusskonfigurationen. Das Gleichgewicht eines kreisförmigen Tokamaks ist recht einfach zu berechnen und erst nicht-kreisförmige Plasmaquerschnitte und Divertoranlagen erforderten aufwendigere Rechenprogramme. Die nutzbaren Einschlusskonfigurationen und Parameterregime sind jedoch eng begrenzt durch Plasmainstabilitäten, die so vielfältiger Natur sind, dass ein eigenes, mehrbändiges Handbuch (verfasst vom Nestor der Innsbrucker Plasma-physik, Ferdinand Cap) darüber existiert. Großskalige, so genannte MHD-Instabilitäten bilden im Allgemeinen harte Grenzen an Plasmastrom oder Plasmadruck. Diese Grenzen sind zwar als Energieprinzip mathematisch elegant formulierbar, aber sehr komplex auszuwerten. Die gute Übereinstimmung der Experimente mit den aus Rechnungen gewonnenen Vorhersagen war in den 70er und 80er Jahren ein sehr überzeugender Triumph der Plasmatheorie.

Kleinskalige Instabilitäten bilden zwar keine harten Grenzen, sind aber die treibenden Kräfte hinter einer vielgestaltigen Turbulenz, die den Energieverlust aus dem Plasma – und damit den erreichbaren Wert von Q – bestimmt. Hier hat die Plasmatheorie erst im letzten Jahrzehnt dramatische Fortschritte gemacht. Auf der einen Seite wurden glaubhafte ab-initio-Modelle entwickelt, die ein quasineutrales, fast stoßfreies Plasma in einem starken inhomogenen Magnetfeld mit einem erweiterten Flüssigkeits- oder einem eingeschränkten kinetischen Ansatz beschreiben können. Der Fortschritt betraf aber vor allem auch die Umsetzung dieser Modelle in Codes, die moderne, hochparallele Computerarchitekturen effektiv nutzen. Die Erwartung ist groß, dass es parallel zu ITER auch einen „numerischen“ Tokamak geben wird, und daher plant die Europäische Union gegenwärtig auch die Förderung eines für die Fusionsforschung dedizierten Höchstleistungsrechners. In seiner Nachfolge wird dann, im Jahre 2012, ein gemeinsam mit Japan errichtetes Fusionsrechenzentrum in Rokkasho in Betrieb gehen – an jenem Ort, der ursprünglich Standortkandidat für ITER war.

Fusionsforschung und Fusionsenergie wurden häufig als ein Reservat der hoch industrialisierten Länder angesehen und damit als zu komplex für jene Gebiete der Erde abgetan, in denen in Zukunft der größte Bedarfszuwachs an Energie bestehen wird. Diese Kritik verkannte aber die Tatsache, dass der starke Zuwachs des Energiebedarfs erst synchron mit dem industriellen Aufstieg eines Landes entsteht, das in diesem Prozess automatisch auch den für die Fusionsforschung notwendigen technischen Standard erreicht. Es ist bezeichnend, dass Korea, China und Indien, die mit unterschiedlichem Phasenverzug diesen Aufstieg erlebt haben, nicht nur Mitglieder des ITER-Verbundes wurden, sondern auch im Begriff sind, eigene nationale Fusionsanlagen fortschrittlichster Bauart in Betrieb zu nehmen. Zusammen genommen repräsentieren die am Projekt ITER selbst mitarbeitenden Staaten mehr als die Hälfte der Erdbevölkerung. Nie zuvor hat sich ein vergleichbarer Anteil der Menschheit an einem gemeinsamen Arbeitsprojekt beteiligt.



Betriebsbeginn wichtiger Tokamakexperimente und ihre Beiträge zum Stammbaum von ITER. Querschnitt in ungefährem Maßstab der Größe. Der Farbcode charakterisiert besondere Merkmale. Gestrichelte Linien: Umbauten zu einer neuen Anlage; durchgezogene Linie: Übernahme wichtiger Merkmale.