

Modul 2

Der Weg zur Fusion

Autor: Arno Claassen

Die Entdeckung grundlegender physikalischer Prinzipien ist ein wesentlicher Aspekt in Wissenschaft und Forschung. Die Finanzierung der Forschung erfolgt durch die Politik, die wiederum unterschiedlichen Interessengruppen verpflichtet ist. Forschung und Gesellschaft sind stets miteinander verknüpft. Deshalb können gerade nicht wissenschaftliche Faktoren den Fortschritt der Forschung in hohem Maß beeinflussen. In diesem Modul wird der Weg zur Fusionsenergie aufgezeigt und der Behauptung nachgegangen, warum „Fusion immer zwanzig Jahre weit entfernt ist“.

Nach diesem Modul wirst du Fusionsforschung im Kontext beurteilen sowie die wichtigsten Typen der Fusionsreaktoren und ihre Unterschiede erklären können. Du wirst über den Einfluss der Politik auf wissenschaftliche Forschung sowie über die Vorteile aber auch Herausforderungen internationaler wissenschaftlicher Zusammenarbeit diskutieren können.

Mit den anderen Modulen kannst du noch mehr über die Herausforderungen und Lösungen auf dem Weg zur Fusion lernen.

Die Entdeckung der Fusion

Woher kommt die Energie der Sonne?

Manche vertreten die Ansicht, dass der Ausgangspunkt wissenschaftlicher Forschung theoretische Überlegungen sind, auf deren Basis Vorhersagen getroffen werden. Diese werden anschließend experimentell überprüft. Auch, wenn man diese Vorgehensweise in der Schule gehört haben mag, stimmt sie nicht unbedingt. Wissenschaft beginnt üblicherweise mit Fragestellungen und Beobachtungen. Für die Fusionsforschung beziehen sich diese Fragestellungen und Beobachtungen auf etwas, das wir jeden Tag sehen: unsere **Sonne**.

Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts gab es keine zufriedenstellenden Modelle, die erklären konnten, warum die Sonne und andere Sterne seit Milliarden Jahren so hell scheinen können. Es gab verschiedene Überlegungen, woher die Energie kommt, die die Sonne zum Leuchten bringt, aber es blieb ein großes Rätsel, warum die Sonne nicht schon längst verglüht war. Falls die Energie von chemischen Reaktionen kommt, wäre der gesamte Brennstoff mittlerweile verbrannt worden. Die aktuelle Größe der Sonne lässt sich nicht erklären, wenn die Sonne ihre Energie aus einem langsamen Schrumpfprozess gewinnen würde. Woher kommt also die Energie der Sonne?

Eddington kommt zu Hilfe

Im Jahr 1920 entdeckte man, dass die Masse von vier Wasserstoffatomen größer ist als die eines einzelnen Heliumatoms. Aus dieser Erkenntnis in Verbindung mit der Beziehung

$$E = m c^2$$

von Einstein aus dem Jahr 1905, entstand die Idee, dass Energie freigesetzt werden kann, indem vier

Protonen in ein Heliumatom verwandelt werden. Im selben Jahr schlug Arthur Eddington vor, dass sich vier einzelne Protonen (Wasserstoffkerne) über eine Folge von Fusionsreaktionen zu einem Heliumkern vereinigen können. Diese Folge von Reaktionen wird **Proton-Proton-Kette (p-p Kette)** genannt. Dabei muss nur ein kleiner Bruchteil der Wasserstoffkerne fusioniert werden, um die emittierte Energiemenge zu erzeugen. Die p-p-Kette lieferte damit eine mögliche Erklärung, warum die Sonne Milliarden Jahre scheinen kann.

Das Modell der p-p Kette wurde allerdings nicht sofort akzeptiert. Dazu wäre eine Temperatur im Sonneninnern nötig gewesen, die um Größenordnungen über der Temperatur der Sonne lag. Acht Jahre später führte George Gamov die mathematische Basis für das Konzept des **Quantentunneleffekts** ein. Der Quantentunneleffekt erlaubt es einigen Teilchen, dass sie einander näher kommen, als es ihre Energie eigentlich zulassen würde. Damit ist aber auch Fusion bei niedrigeren Temperaturen, als man ursprünglich angenommen hatte, möglich. 1929 wiederholten Robert Atkinson und Fritz Houtermans die Berechnungen von Eddington



Abbildung 2.1. Arthur Eddington. Quelle: Library of Congress, Prints & Photographs Division, LC-B2- 6358-11.

Klassenaufgabe 2.1

- (a) Die Sonne hat eine Masse von ungefähr 1.989×10^{30} kg. Die Masse eines einzelnen Protons beträgt 1,007 amu. Unter der Annahme, dass die ganze Sonne aus Protonen besteht, wie viele Protonen sind in der Sonne? 1 amu entspricht 1.661×10^{-27} kg.
- (b) Die Energie, die während der p-p-Kette freigesetzt wird, beträgt 26,73 MeV pro erzeugtem Heliumatom. Wie viel Energie kann gewonnen werden, wenn alle Protonen von (a) in der Sonne zu Helium fusionieren? 1 MeV entspricht 1.602×10^{-13} J.
- (c) Wie lange kann die Sonne scheinen, wenn sie diese Energie mit einer konstanten Leistung von 3.828×10^{26} W abstrahlt?
- (d) Ist die in (c) berechnete Zeitdauer deiner Meinung nach realistisch? Diskutiere mit deinen Nachbarn.
- (e) Astronomen erwarten, dass die Sonne nur 10% ihrer Protonen fusionieren kann, bevor sie in die nächste Phase im Leben eines Sterns eintritt. Kannst du dir einen Grund vorstellen, warum die Sonne nicht alle Protonen fusionieren kann?

unter Berücksichtigung des Quantentunneleffekts. Die Berechnungen lieferten gute Resultate für die Temperatur im Inneren der Sonne. Der Schluss lag nahe, dass die von der Sonne abgegebene Strahlungsenergie aus Kernfusionsreaktionen resultierte.

Neue Wege der Forschung

Da die Energieproduktion der Sonne nun mit Kernfusion erklärt werden konnte, war die Frage naheliegend, ob Fusion auch auf der Erde möglich ist. In der Folge wurden einige Experimente gestartet, die diese Frage beantworten sollten. Zu Beginn der 1930er Jahre benutzten Wissenschaftler, wie Mark Oliphant, Paul Harteck und Ernest Rutherford, Teilchenbeschleuniger, um schnelle Deuteriumionen auf Deuteriumatome, die in einem Festkörper eingeschlossen waren, zu schießen. Die Kerne einiger Ionen fusionierten mit den Kernen der Atome. Die erste von Menschen durchgeführte Fusion war gelungen, ebenso konnte erstmals Tritium künstlich produziert werden.

Im nächsten Schritt wollte man klären, ob diese Technik genutzt werden konnte, um Energie zu erzeugen. Wieder wurden zahlreiche Experimente durchgeführt, aus deren Ergebnissen die Wissenschaftler die Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Fusionsreaktionen berechnen konnten. Die berechneten Wahrscheinlichkeiten waren extrem niedrig und standen im Einklang mit den theoretischen Vorhersagen. Eine Frage war z.B. wie „langsam“ die Sonne ihren Wasserstoff in Helium fusioniert. Das Schießen von Ionen auf Atome erwies sich damit als keine effektive Methode zur Energieproduktion. Es war wahrscheinlicher, dass die Ionen von den Atomen abprallten und in alle Richtungen **streuten**. Wenn die Ionen streuen, geben sie einen Teil ihrer Energie an die Atome, ab. Das führt dazu, dass die eingeschlossenen Atome stärker schwingen und folglich die Temperatur im Festkörper steigt. Andererseits werden die Ionen aufgrund der Streuung abgebremst, bis sie nicht mehr mit den Atomen fusionieren können. Da **Streuung** signifikant wahrscheinlicher als Fusion ist, wird es immer mehr Energie kosten, die Ionen zu beschleunigen, als von den wenigen stattgefundenen Fusionsreaktionen Energie gewonnen werden kann.

Um ein Fusionskraftwerk zu bauen, muss sichergestellt sein, dass die Teilchen lang genug mit ausreichender Energie für Fusion eingeschlossen bleiben. Das bedeutet, man muss Bedingungen vergleichbar denen der Sonne schaffen. In anderen Worten, man benötigt hohe Dichte und hohe Temperatur

Die ersten Anlagen

Ein langsamer Start

Zur Zeit des zweiten Weltkriegs begann man mit einigen ersten Entwürfen von Fusionsreaktoren. Regierungen und Geldgeber hatten keine Ahnung von Fusionsenergie und sahen deshalb keinen Grund, in Fusionsforschung zu investieren. Es dauerte bis zu Beginn der 1950er Jahre, als ein Mann namens Ronald Richter behauptete, dass er Energie aus Fusion erzeugt hätte. Die Geschichte von Richter verbreitete sich schnell auf der ganzen Welt. Die Fusionsforschung nahm Fahrt auf.

Die Medienberichterstattung hatte zwei unmittelbare Auswirkungen. Die Finanzierung der Fusionsforschung wurde für Politiker plötzlich interessant. Sie hofften den wissenschaftlichen Anschluss nicht zu verpassen. Vielleicht hofften sie auch, sich zu profilieren. Außerdem wurde die Fusionsforschung weltweit bei Wissenschaftlern bekannt. In den 50er Jahren wurde Fusion aber vor allem in Großbritannien, den USA und der Sowjetunion erforscht.

Britische Forscher experimentierten hauptsächlich mit sogenannten Pinch-Maschinen. Diese werden in diesem Kapitel als erstes besprochen. Amerikanische und britische Wissenschaftler arbeiteten an einigen dieser Projekte zusammen. Der Hauptbeitrag der US-Wissenschaftler war aber die Entwicklung des Stellarators, der später in diesem Kapitel besprochen wird. Der Beitrag der Sowjetunion ist der Entwurf des Tokamaks, den wir bereits in Modul 1 kennengelernt haben. Die Geschichte des Tokamaks wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels erzählt.

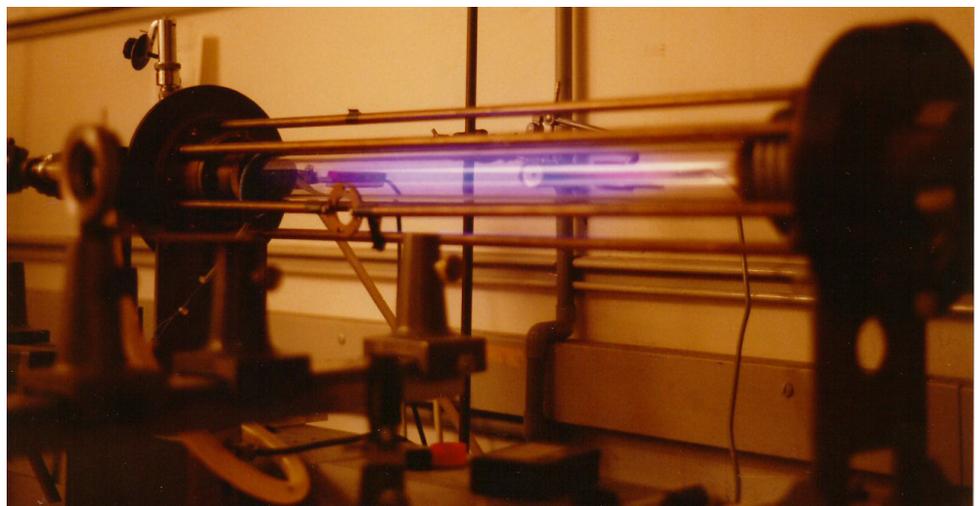
Pinch-Anlagen

Mit Pinch-Maschinen wurden die ersten ernsthaften Versuche unternommen, einen Fusionsreaktor zu bauen. Das Plasma wird mithilfe eines Magnetfeldes, das vom Plasmastrom selbst kommt, zusammengedrückt. Die Grundlage dazu liefert die Lorentzkraft. Ein Beispiel für die Lorentzkraft ist, wenn sich zwei parallele Leiter, in denen Strom in dieselbe Richtung fließt, gegenseitig anziehen. Es gibt zwei verschiedene Bauarten von Pinch-Maschinen, z und θ (Theta). Beide Bauarten verwenden ein zylinderförmiges Plasma. Der Unterschied zwischen beiden ist die Richtung des Stroms und des Magnetfelds.

Der z-Pinch

Das Magnetfeld des z -Pinch wird durch einen Strom innerhalb des Plasmas erzeugt. Der Strom fließt parallel zur Achse des Zylinders. Diese Richtung wird in Zylinderkoordinaten als z -Richtung bezeichnet. Das erzeugte Magnetfeld umgibt den Plasmastrom kreisförmig, zeigt also entlang der Oberfläche des Zylinders. Man kann sich vorstellen, dass der Plasmastrom aus vielen parallel verlaufenden Strömen besteht. Zwei parallele Leiter, in denen Strom in dieselbe Richtung fließt, ziehen sich aufgrund der Lorentzkraft gegenseitig an. Deshalb wird das Plasma radial gestaucht. In Bereichen hoher Stromdichte ist die Kraftwirkung besonders stark. Die damit einhergehende Erhöhung der Teilchendichte ermöglicht es Fusionsbedingungen zu erreichen.

Abbildung 2.2. Ein z -Pinch in table-top Größe mit einem glühenden Wasserstoffplasma. Die Metallstäbe parallel zum Glasgefäß dienen dazu den Stromkreis zu schließen, da der Strom durch das Plasma in die eine Richtung fließt und durch die Metallstäbe zurückfließt.



Klassenaufgabe 2.2

- (a) Welche Kraft bringt das Plasma dazu, sich in einem Pinch zusammenzuziehen?
- (b) Betrachte einen z-Pinch. Die Richtung des Stroms soll in das Papier zeigen. Zeichne die Richtung des Magnetfelds, den der Plasmastrom erzeugt. Zeichne weiters die Richtung der Kraft, die auf das Plasma in der Nähe des Zentrums wirkt.
- (c) Betrachte einen θ -Pinch. Zeichne einen Kreis. Der Strom soll entlang des Kreises im Uhrzeigersinn fließen. Für einen θ -Pinch benötigt man ein äußeres Magnetfeld. In welche Richtung soll das Magnetfeld zeigen, damit die Lorentzkraft im äußersten rechten Punkt einwärts zeigt?

Der θ -Pinch

Ein θ -Pinch ist ein bisschen komplizierter. In einem θ -Pinch sind die Richtungen von Magnetfeld und Strom vertauscht. Die Ströme fließen parallel zur Zylinderoberfläche. Wenn man entlang der Zylinderachse schaut, fließen die Ströme in Kreisen. Diese Richtung wird als θ -Richtung bezeichnet. Das Magnetfeld zeigt dann entlang der Zylinderachse. Wie das Plasma in diesem Fall zusammengedrückt wird, ist schwieriger zu erklären als bei einem z-Pinch und wird in diesem Modul nicht besprochen. Was jedoch gesagt werden kann, ist, dass das Plasma im θ -Pinch stabiler als im z-Pinch ist. Das bedeutet, dass Instabilitäten, die die Anlage zerstören können, weniger wahrscheinlich in einem θ -Pinch als in einem z-Pinch auftreten.

Der erste detaillierte Entwurf zum Bau einer z-Pinch-Maschine stammt von einem britischen Physikstudenten aus dem Jahr 1939. Dem Studenten wurde damals geraten, sich mit etwas anderem in seiner Abschlussarbeit zu beschäftigen. So dauerte es bis 1948, als der erste Prototyp eines z-Pinch realisiert wurde. Da man nicht genug Geldmittel aufreiben konnte, wurden zum Bau des Prototyps Teile aus einer alten Radaranlage aus dem 2. Weltkrieg verwendet. Die Dinge änderten sich, als die Geschichte von Richter weltweit bekannt wurde. Plötzlich waren die Regierungen bereit Fusionsforschung zu finanzieren. In der Folge entstanden in Großbritannien, den USA und der Sowjetunion verschiedene Projekte mit Pinch-Anlagen.

Von der Geheimhaltung im Kalten Krieg bis zur Zusammenarbeit

Während des 2. Weltkrieges wurde Fusionsforschung geheim gehalten. Die Entdeckung, dass die Technologie der Pinch-Maschinen für Bomben genutzt werden konnte, sowie ein Spionageskandal in England veranlasste Regierungen noch sorgfältiger mit ihren Ergebnissen aus der Fusionsforschung umzugehen. Die gesamte Forschung wurde von den Universitäten an geheime Orte verlegt und Ergebnisse wurden kaum zwischen den Ländern ausgetauscht. Da der Westen Allianzen während des Kalten Krieges bildete, arbeiteten Großbritannien und die USA an einigen Projekten zusammen und tauschten einige Erkenntnisse untereinander aus.

Im Jahr 1956 hielt ein sowjetischer Wissenschaftler in Großbritannien einen Vortrag über Fusionsforschung. Er erwähnte auch Schwierigkeiten, auf die die sowjetischen Wissenschaftler im Rahmen ihrer Forschung gestoßen waren. Jedem war sofort klar, dass sie alle, d.h. Briten, US-Amerikaner und Sowjets, an Fusion forschten und dabei auf dieselben Probleme gestoßen waren. Es stellte sich die Frage, ob es nicht besser wäre, die Ergebnisse der Fusionsforschung öffentlich zugänglich

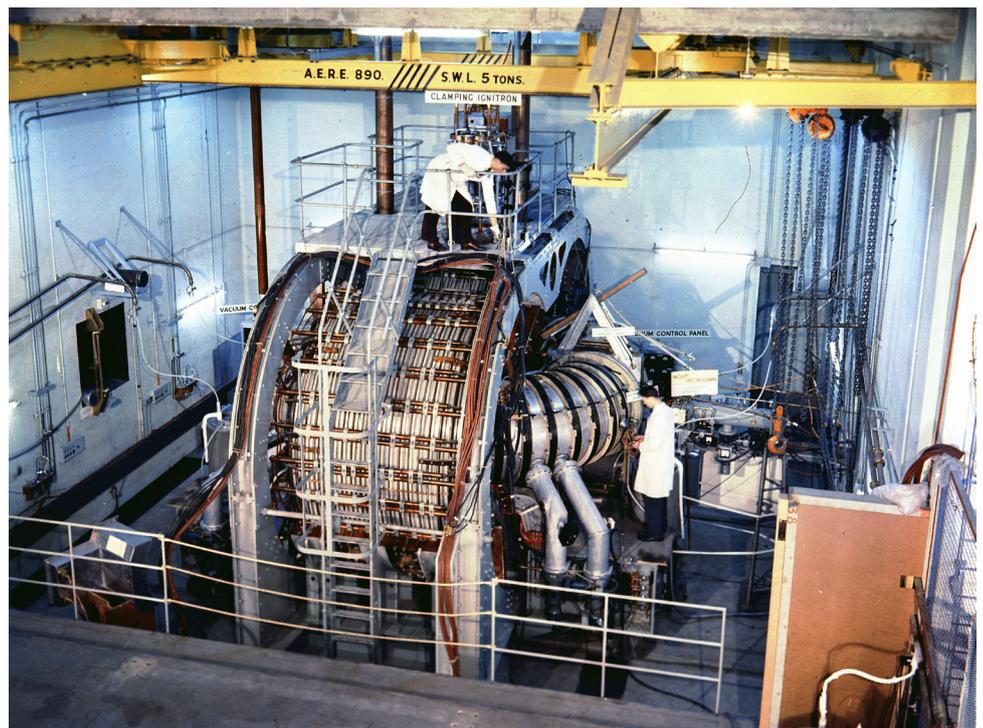


Abbildung 2.3. Zwei Forscher bei Arbeiten am größten klassischen Pinch, ZETA

zu machen. Es war zwar wahrscheinlich, dass alle unabhängig voneinander Lösungen finden würden, aber eine Zusammenarbeit könnte den Forschungsprozess wesentlich beschleunigen.

Bald danach begann die Sowjetunion ihre Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Plasmaphysik zu veröffentlichen. Später folgten die USA und Großbritannien. Das war im Jahr 1958, unmittelbar vor der 2. „Atoms for Peace“ Konferenz. Im selben Jahr gelangen mit der θ -Pinch-Maschine **Scylla** die ersten Fusionsreaktionen mit hohem Druck und hoher Temperatur. Berechnungen zeigten, dass die Konstruktion von Scylla noch nicht geeignet war, um auf ihrer Basis ein erfolgreiches Kraftwerk zu bauen. Trotzdem gelang mit Scylla ein Durchbruch auf dem Gebiet der Fusionsforschung. Ungefähr im selben Jahr wurde mit **ZETA** die größte Pinch-Anlage fertiggestellt.

Während ZETA eine Vielzahl von Fusionsreaktionen erzeugen konnte, produzierte die Anlage nie mehr Energie aus Fusion als man benötigte, sie zu betreiben. ZETA blieb zwölf Jahre in Betrieb. In dieser Zeit wurde zahlreiche Experimente durchgeführt. Die Ergebnisse führten auch zu neuen Methoden in der Messung der Plasmatemperatur. Gegen Ende der 1960er Jahre wurde die Entwicklung von Pinch-Reaktoren zugunsten vielversprechenderer Konstruktionen weitgehend eingestellt.

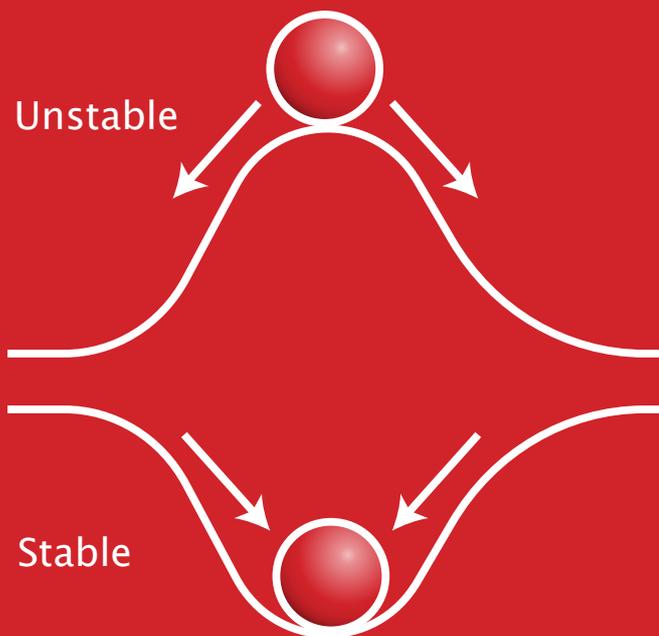


Abbildung 2.4. Schematische Darstellung eines stabilen versus eines instabilen Systems. Beide Kugeln bleiben unendlich lang an Ort und Stelle, solange sie nicht angestoßen werden. Die Kugel auf der Spitze des Hügels wird bereits durch einen leichten Stoß ins Rollen gebracht. Aus diesem Grund wird das obere System als instabil bezeichnet. Wenn man hingegen der Kugel in der Mulde einen kleinen Stoß gibt, wird sie wieder in die Mulde zurückrollen. Deshalb gilt das untere System als stabil.

Systeme unter Realbedingungen erfahren die ganze Zeit kleine Stöße. Eine Windbö oder eine Erschütterung des Bodens hätte ernsthafte Folgen für das obere System, aber nicht für das untere. In Fusionsplasmen gibt es eine Vielzahl von Dingen, die im übertragenen Sinn die Kugel zum Hinunterrollen bringen und, unkontrolliert überlassen, eine ernsthafte Gefahr für das Plasma darstellen.

Randbemerkung Instabilitäten

Es gibt viele Hindernisse auf dem Weg zur Fusion, die zur oft gemachten Behauptung führen, dass Fusion immer 20 Jahre davon entfernt ist, realisiert zu werden. Instabilitäten gehören zu diesen Hindernissen. Eine Instabilität ist eine Störung, die nur einen kleinen Anstoß benötigt, um zu beginnen und sich dann weiter zu verstärken. Wie eine Kugel, die einen Hügel hinunterrollt, wird eine Instabilität nur stoppen, wenn sie durch irgendetwas zum Stillstand gebracht wird. In einem Plasma gibt es verschiedene Arten von Instabilitäten.

Beispielsweise sind Ströme in einem geradlinigen Plasma instabil. Wenn der Stromfluss nur leicht abweicht, wird sich dieser Effekt weiter verstärken. Das leitfähige Plasma beginnt sich mehr und mehr zu krümmen, bis es durch die Wand gestoppt wird. Das verursacht schwere Schäden am Fusionsreaktor. Aus diesem Grund werden die meisten Instabilitäten entweder vermieden oder Wissenschaftler versuchen sie zu kontrollieren, damit die Plasmakonfiguration nicht zu sehr gestört wird und eine Beschädigung des Reaktors vermieden werden kann.

Stellaratoren

Als Ronald Richter behauptete, dass ihm Fusion gelungen sei, erreichten die Neuigkeiten die Wissenschaftler auf der ganzen Welt. Unter ihnen war der amerikanische Wissenschaftler Lyman Spitzer. Als Spitzer auf Skiurlaub fuhr, erreichte ihn ein Telefonanruf von seinem Vater, der ihm über Richters sogenannte Errungenschaft berichtete. Spitzer erkannte sofort, dass Richters Behauptung falsch war, da seine Apparatur niemals das Plasma zu Fusionstemperaturen hätte heizen können. Während er am Skilift saß, begann er darüber nachzudenken, wie ein Fusionsreaktor aussehen könnte. Er kam auf das Konzept des **Stellarators**, das er 1958 veröffentlichte.

Das Grundkonzept des Stellarators ist relativ naheliegend. Das Design ist dem eines Tokamaks, der kurz am Ende des 1. Moduls erklärt wurde, sehr ähnlich. Stellarator und Tokamak benutzen Magnetfelder für den Plasmaeinschluss. Die Vakuumkammer hat im Prinzip die Form eines Donuts. Im Gegensatz zum Tokamak sind die Magnetspulen beim Stellarator um die gesamte Vakuumkammer gewickelt. Das Magnetfeld zeigt größtenteils in die toroidale Richtung.

Teilchendrift

Benutzt man ausschließlich ein Toroidalfeld, wird das Plasma instabil. Das wurde bereits in Modul 1 erwähnt. Wenn das Plasma im Torus zirkuliert, folgt es nicht nur den Feldlinien, sondern bewegt sich auch in vertikale Richtung. Man bezeichnet diesen Vorgang als (Teilchen-) **Drift**. Die Gründe für das Driften sind vielfältig.

Beispielsweise liegen in einer toroidalen Magnetspule die Windungen in der Nähe der Öffnung enger beieinander als die Windungen auf der **Außenseite**. Enger aneinander liegende Windungen führen zu einem stärkeren Magnetfeld. Da das Magnetfeld auf der Innenseite stärker als das Magnetfeld auf der Außenseite ist, beginnen die Teilchen in vertikaler Richtung zu driften. Diese Art von Drift wird als **Gradientendrift** bezeichnet und wird etwas später eingehender in einer Zusatzaufgabe erklärt.

Das Driften ist nicht nur ein Problem, weil es das Plasma gegen die Wand oder die Decke drückt, sondern weil es auch die Ladungen trennt. Ionen und Elektronen driften in entgegengesetzte Richtungen. Während sich also alle positiven Ladungen in die eine Richtung bewegen, driften alle negativen Ladungen in die andere Richtung. Diese Trennung der Ladungen macht das Plasma extrem instabil und verursacht sogar noch mehr Drift.

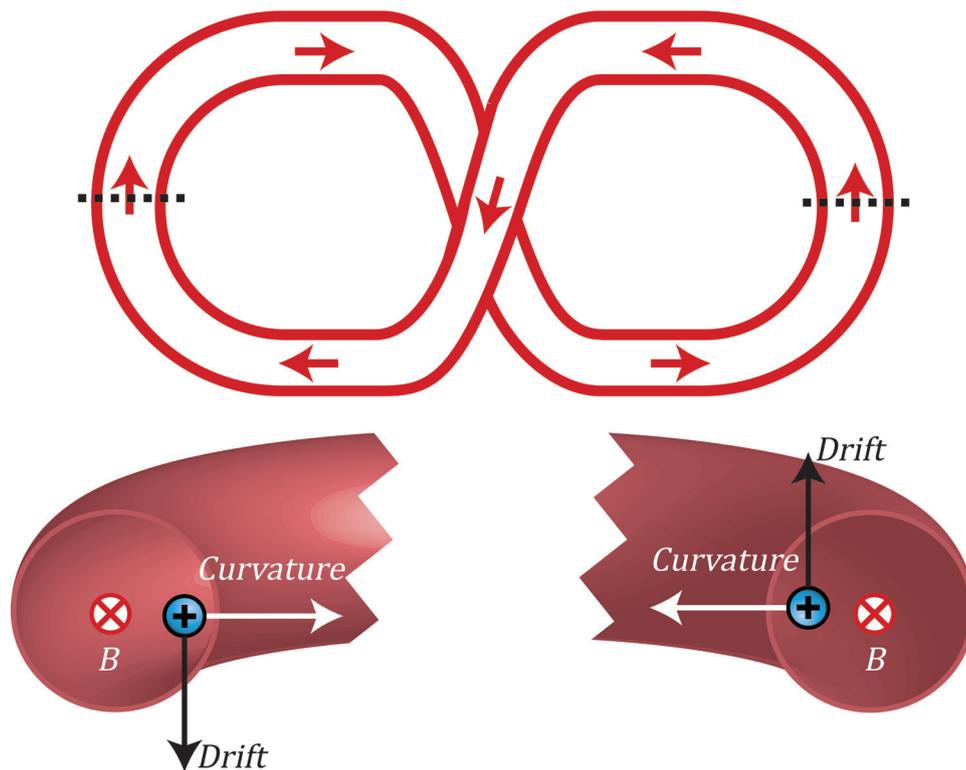
Der Umgang mit der Drift

Es gibt keine Möglichkeit die Teilchen am Driften zu hindern. Die Forscher suchten daher nach einer Lösung, wie sich die Drift selbst auslöschen kann. Dazu soll das Teilchen zuerst für eine kurze Zeit in eine Richtung driften dürfen, bevor man es dazu bringt, in die entgegengesetzte Richtung zu driften. Beispielsweise lässt man das Teilchen wiederholt nach oben driften und unten driften, sodass es im Schnitt in derselben Höhe bleibt.

Die beste Methode diese alternierende Drift zu erreichen, besteht durch die Erzeugung eines schraubenförmigen Magnetfeldes. In einem derartigen Feld schrauben sich die Magnetfeldlinien spiralförmig durch den Donut, anstatt horizontale Kreise zu formen, wie es in einer toroidalen Magnetspule der Fall ist. Das veranlasst die Teilchen alternierend nach innen und außen zu driften. Die Änderung des Magnetfelds von Kreisen zu Spiralen wird als das „Hinzugeben von **Rotationstransformation** zum Magnetfeld“ bezeichnet. In Tokamaks wird die Rotationstransformation durch den Plasmastrom erzeugt. Stellaratoren hingegen erzeugen die Rotationstransformation durch die Art und Weise, wie die Hauptfeldspulen um die Vakuumkammer gewickelt sind.

Beispielsweise wird der Torus manchmal in eine 8-förmige Gestalt verdreht. Die Teilchen driften in entgegengesetzte Richtungen, weil sich das Vorzeichen der Krümmung zwischen beiden Teilen des Achter-Stellarators ändert, wenn sich ein Teilchen durch den Torus bewegt. Beispielsweise bewegt sich ein Ion im Uhrzeigersinn durch die linke Hälfte des Stellarators,

Abbildung 2.5. Ein Ion wandert entlang des Magnetfeldes in einem Achter-Stellarator. Die roten Pfeile zeigen die Richtung des Magnetfeldes und die Richtung der toroidalen Geschwindigkeit des Ions. Es läuft im Uhrzeigersinn im linken Teil des Stellarators und gegen den Uhrzeigersinn im rechten Teil. Ein poloidaler Querschnitt der äußersten linken und äußersten rechten Seite ist im unteren Bild zu sehen. In diesem poloidalen Querschnitt sind die Richtungen der Drift (schwarz), der Krümmung (weiß) und des Magnetfeldes (rot) dargestellt. Da sich das Vorzeichen der Krümmung bei Bewegung vom linken zum rechten Teil ändert, hebt die Drift in der rechten Hälfte die Drift in der linken Hälfte auf, sodass das Teilchen nach einem vollen Umlauf wieder auf derselben Höhe ist.



aber gegen den Uhrzeigersinn in der rechten Hälfte. Da sich das Vorzeichen der Krümmung umdreht, dreht sich auch die Richtung der Drift um. Wenn die Teilchen schnell genug sind, driften sie nur kurz in die eine Richtung, bevor sie in die andere Richtung zurückdriften, sodass keine Nettodrift existiert. Andere Methoden bestehen darin, mehr Spulen mit komplexen Formen zu benutzen, um ein schraubenförmigeres Magnetfeld zu erzeugen, das alternierendes Einwärts- und Auswärtsdriften ermöglicht.

Die erste Generation von Stellaratoren

Der erste Stellarator war eine kleine Anlage, die auf einem Tisch Platz hatte. 1953 wurde der erste vielversprechende Stellarator, das Modell A, fertiggestellt. Im nächsten Schritt baute man eine größere Version. Bei Modell B tauchten bereits einige Probleme auf. Da die Magnete Strom führen, erfahren sie eine Kraft infolge des Magnetfeldes der anderen Magnete sowie ihres eigenen Magnetfeldes. Diese Kräfte führen zu einer Bewegung der Magnete, wenn sie nicht sorgfältig fixiert sind. Obwohl die

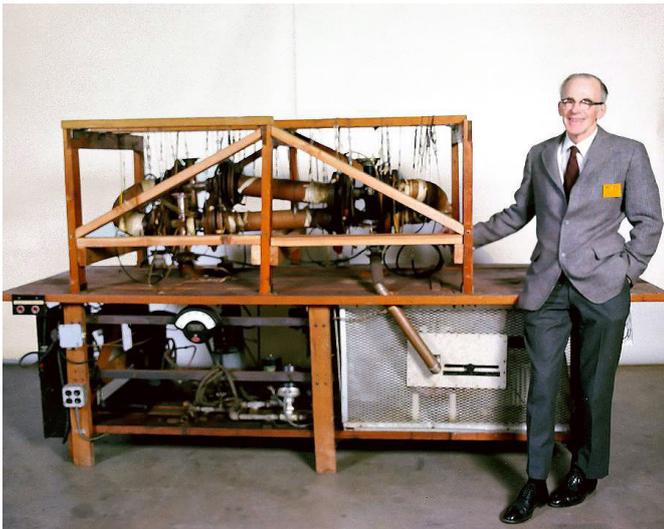


Abbildung 2.6. Lyman Spitzer neben dem Model A Stellarator.

Magnete sich bewegten, zeigten einige Maschinen einen guten Einschluss. Nachdem die Konstruktion weiter verbessert wurde, stieß man auf ein anderes Problem. Man bemerkte, dass das Plasma schneller als erwartet abkühlte. Der Grund für die Abkühlung sind Verunreinigungen innerhalb des Plasmas. Dabei handelt es sich um Atome, die nicht Teil des Brennstoffs selbst sind, stattdessen z.B. von der Wand kommen. Diese Verunreinigungen kühlen das Plasma ab, indem sie dem Plasma Energie entziehen und diese in Form elektromagnetischer Strahlung wieder abgeben. Um das Plasma sauber zu halten, wurden für noch heißere Plasmen verbesserte Vakuumkammern eingesetzt.

Vom Modell B wurden unterschiedlichste Versionen gebaut. Es wurden verschiedene Formen und Bauweisen getestet, um zu sehen, was funktioniert und wo Probleme gelöst werden mussten. Unglücklicherweise zeigten alle Modell B Maschinen ein spezifisches Problem, genannt **"pump out"**. Das Plasma driftete viel schneller aus dem Einschluss als alle theoretischen Modelle vorhersagten. Nachfolger von Modell B war Modell C. Bei Modell C wurde der Torus so verbogen, dass er Ähnlichkeit mit einer Rennbahn bekam. Modell C verfügte weiters über mehrere Heizquellen und einem **Divertor**. Ein Divertor ist der „Auspuff“ eines Fusionsreaktors und wird detaillierter in Modul 4 erklärt.



Abbildung 2.7. Der Modell B-2 Stellarator mit seiner charakteristischen 8-förmigen Gestalt. Quelle: PPPL.

Die Leistung der Stellaratoren blieb dennoch hinter den theoretischen Vorhersagen. Mehr Grundlagenforschung wurde benötigt, um zu verstehen, warum das Plasma nicht in der Maschine gehalten werden konnte. Nach vielen Experimenten und einigen Jahren Forschung konnten Physiker Plasmen besser verstehen. Der Einschluss wurde verbessert, bis die von der Theorie erwarteten Werte experimentell erreicht werden konnten. Im Jahr 1969 erreichte Modell C die Rekorderlektronentemperatur von 4,6 Millionen Grad Celsius!

Keine einfache Lösung für den Einschluss

Obwohl man zu dieser Zeit bereits relativ hohe Temperaturen in Fusionsplasmen erreichte, war man noch immer sehr weit weg von den 150 Millionen Grad Celsius, die für einen Fusionsreaktor erforderlich waren. Ursprünglich glaubte Spitzer, dass Stellaratoren besser geeignet waren als andere Anlagen. Er nahm an, dass im Stellarator keine Bohm-Diffusion auftreten würde. Nach der klassischen Diffusionstheorie sollte ein doppelt so großes Magnetfeld einen viermal besseren Einschluss erzielen. Nach Bohm hingegen erwartete man, dass sich der Einschluss nur linear mit dem Magnetfeld verbessert. Während der Experimente und der Forschung in den 1960er Jahren kristallisierte sich heraus, dass Bohm-Diffusion eine fundamentale Eigenschaft von Plasmen war.

Da durch eine Verdoppelung des Magnetfelds nur ein doppelt so guter Einschluss erzielt wurde, würde es deutlich schwieriger werden, den erforderlichen Einschluss zu erreichen. Ein linearer Zusammenhang zwischen Magnetfeld und Einschlusszeit würde Fusion praktisch unmöglich machen. Das erforderliche Magnetfeld müsste stärker sein, als man es technisch für möglich hielt. Die Wissenschaftler begannen an einem Erfolg der Fusion zu zweifeln. Bei einem Reaktortyp hingegen zeigte sich ein wesentlich günstigerer Teilcheneinschluss: der **Tokamak**.

Tokamaks

1950 schrieb ein gelangweilter Unteroffizier der Roten Armee, der auf Sachalin, einer russischen Insel in der Nähe von Japan, stationiert war, einen Brief an die Führung der Sowjetunion. Darin äußerte er die Idee, den für Fusion notwendigen Brennstoff mithilfe einer Atombombe in den Plasmazustand zu verwandeln. Das heiße Plasma sollte dann für eine stationäre Energieproduktion eingeschlossen werden. Der Brief wurde an Andrei Sacharow geschickt, der die Idee trotz großer Mängel interessant fand. Gemeinsam mit Igor Tamm begann Sacharow an einer detaillierteren Studie zu arbeiten, wie ein Fusionsreaktor gebaut werden konnte. Die erste Idee bestand darin, das Plasma innerhalb einer Zylinderspule, die in die Form eines Donuts gebogen wurde, einzuschließen. Auf Grund der Drift war aber der Einschluss des Plasmas nicht möglich.

Um das Problem zu lösen, schlug Sacharow vor, mithilfe eines Kreisstroms dem Magnetfeld eine Rotationstransformation hinzuzufügen. Eine Möglichkeit bestand darin, einen stromführenden Draht in der Maschine anbringen. Eine andere Möglichkeit war, die geladenen Teilchen in Bewegung zu setzen, also einen Strom innerhalb des Plasmas selbst zu erzeugen. Da es nicht sinnvoll ist, einen Draht innerhalb des Plasmas, das heißer als der Kern der Sonne ist, anzubringen, wurde die ursprüngliche Idee nur für anfängliche Experimente und Machbarkeitsstudien verwendet.

Es gibt verschiedene Methoden einen Strom innerhalb eines Plasmas zu generieren. Die einfachste wurde in Modul 1 erklärt. Sie funktioniert mithilfe magnetischer Induktion und ist die meistbenutzte Methode einen Plasmastrom in Tokamaks zu erzeugen. Dazu wird innerhalb der Öffnung des Tokamaks ein Magnetfeld zeitlich geändert. Die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses induziert den Strom im Plasma. Aus diesem Grund arbeiten Tokamaks gepulst. Das ist ein wesentlicher Unterschied zu Stellaratoren, die im Prinzip in einem Dauerbetrieb laufen können. Während mit Tokamak-Konstruktionen experimentiert wurde, entdeckten Wissenschaftler in der Sowjetunion unabhängig den Pinch-Effekt und begannen ihre eigenen Experimente mit Pinch-Anlagen, wie im ersten Abschnitt des Kapitels erläutert wurde. Aufgrund dieser Entdeckung dauerte es einige Zeit bis ein Tokamak, wie man ihn heute kennt, gebaut wurde, da ein größerer Fokus auf den Experimenten mit den Pinch-Anlagen lag.

Die ersten Tokamaks

1958 wurde mit **T-1** der erste Tokamak gebaut. T-1 hatte Probleme mit Verunreinigungen, die das Plasma kühlten, sodass eine Konstruktion mit einer verbesserten Vakuumkammer, **T-2**, notwendig wurde. 1958 fand die „Atoms for Peace“ Konferenz. Die Konferenz war zu früh, um die mit T-2 erreichten Resultate präsentieren zu können. Aber die sowjetischen Forscher lernten während dieser Konferenz Spitzers Stellarator-Entwurf



Abbildung 2.8. Igor Tamm links und Andrei Sacharov rechts, die Köpfe hinter dem Tokamak Design.

kennen. Die Wissenschaftler waren so begeistert von den präsentierten Resultaten, dass sie ihre eigenen Stellaratoren bauen wollten.

Man schlug sogar Natan Yavlinsky vor, die neue Fusionsmaschine **T-3** nicht als Tokamak, sondern als Stellarator zu entwerfen. Natan Yavlinsky war der Konstrukteur des T-1. Er war überzeugt vom Tokamak und hielt deshalb an diesem Design fest. Der Plasmastrom konnte das Plasma heizen und eine gute Plasmaheizung war für Stellaratoren noch in Entwicklung. Ein Blick auf die Fusionsgeschichte zeigt, dass es wichtig war, am Tokamakdesign festzuhalten, da die Wissenschaftler bald an einem Erfolg der Fusion zu zweifeln begannen.

Klassenaufgabe 2.3

- (a) Betrachte die poloidale Schnittebene. Zeichne die Richtung des Magnetfelds, das von einer Zylinderspule erzeugt wird. Ergänze in der Zeichnung die Richtung des Magnetfelds, das vom Plasmastrom erzeugt wird.
- (b) Wiederhole die Aufgabe für die toroidale Schnittebene.

Resultate werden mit Skepsis aufgenommen

1965 fand im neuen britischen Forschungszentrum in Culham ein internationales Treffen zum Thema Fusion statt. Es stellte sich heraus, dass alle bedeutenden Konstruktionen **Probleme mit dem Plasmaeinschluss** hatten. Die Bohm-Diffusion erwies sich als **fundamentales Problem**, das man weder mit dem Stellarator noch mit den Pinch-Anlagen in den Griff bekommen konnte. Weniger bekannte Bauweisen schienen nicht besser zu sein. Aber dann präsentierte die Sowjetunion die Resultate einer toroidalen Pinch-Anlage, die einem Tokamak ähnelte. Mit der Anlage wurden Temperaturen erreicht, die 10fach höher waren, als man aufgrund der Bohm-Diffusion erwarten durfte.

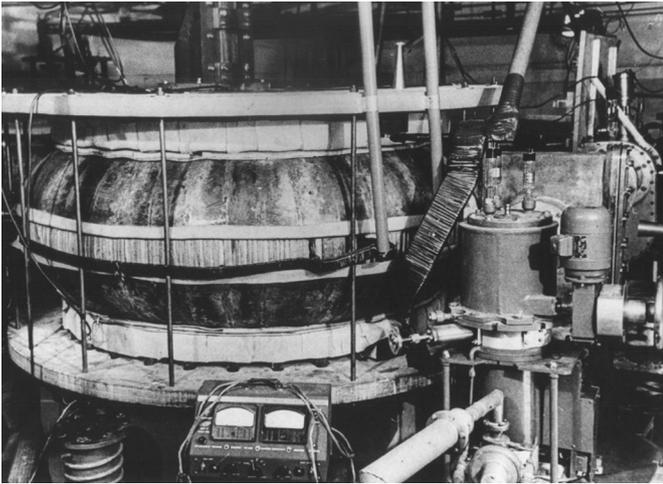


Abbildung 2.9. T-1, der erste Tokamak. Der große Radius des Torus beträgt 0,67 m, der kleine 0,17 m. Seine Magnete konnten ein Magnetfeld von 1,5 T erzeugen. Der Plasmastrom betrug 100 kA.

Diese Ergebnisse wurden mit großer Skepsis aufgenommen. Besonders britische Wissenschaftler glaubten, dass die sowjetischen Forscher einige Fehler gemacht hatten, weil der toroidale Pinch der Sowjets ähnlich wie die ZETA-Maschine gebaut war. Die Sowjets hatten eine vergleichbare Methode zur Temperaturmessung verwendet wie die Briten bei ZETA, als diese glaubten mit ZETA Nettoenergie aus Kernfusion erzeugt zu haben. Deshalb zweifelten die Briten die Messung auch an. Die politischen Spannungen zwischen Ost und West waren einer objektiven wissenschaftlichen Diskussion kaum förderlich.

Spitzer führte bei damaligen Treffen den Vorsitz. Er argumentierte, dass die Unsicherheit bei der Temperaturmessung zu groß war und beendete damit kurzerhand die Diskussion. Sogar die Forscher aus der Sowjetunion mussten eingestehen, dass die Methode zur Messung der Temperatur nicht genau genug war, um mit Sicherheit sagen zu können, dass die Temperatur über dem durch die Bohm-Diffusion gesetzten Limit lag.

Nicht zu erschüttern

Im Jahr 1968 publizierte die Sowjetunion die Resultate ihres T-3 Reaktors. Die Temperaturen waren mehr als eine Größenordnung höher als in jeder anderen Maschine. Wie drei Jahre zuvor wurden diese Resultate wieder mit großer Skepsis aufgenommen, weil sie über eine indirekte Messung erhalten wurden. Die Sowjets wollten sich nicht wieder auf eine Diskussion einlassen, in der ihre Ergebnisse massiv angezweifelt wurden.

Also erlaubten sie den Briten, ein Team in ihr Forschungszentrum in der Sowjetunion zu entsenden. Britische Wissenschaftler hatten eine neue Methode entwickelt, die Plasmatemperatur direkt über **Thomson-Streuung** zu messen. Für die Sowjetunion war eine Einladung dieser Art mehr als ungewöhnlich. Es kam in der Sowjetunion äußerst selten vor, Leute aus dem Westen in die Sowjetunion einzuladen, geschweige denn Wissenschaftlern zu erlauben, Forschung an einem sowjetischen Forschungszentrum zu betreiben. Die Briten entsandten ein hochrangiges Team, das als **Culham five** in die Geschichte einging. Culham Five führten ihre Messungen durch und ein Jahr später wurden die Ergebnisse publiziert.

Die Quintessenz der Publikation: die von der Sowjetunion berichteten Resultate waren korrekt und waren in der Tat viel besser als jede Fusionsanlage jener Zeit lieferte. Mit der Bestätigung der unglaublichen Resultate durch britische Wissenschaftler schöpften die Fusionsforscher wieder Hoffnung. Der Tokamak stand nun im Fokus der Fusionsforschung. Viele Stellaratoren wurden in Tokamaks umgewandelt und neue Tokamaks wurden auf der ganzen Welt errichtet.

Das Wettlauf, den großen Erfolg in der Fusionsforschung mit dem Tokamak zu erzielen, hatte begonnen.

Durchbruch und Rückschlag

Größer und besser

Der Fokus der Fusionsforschung war nun auf den Tokamak gerichtet. Man baute immer größere Reaktoren in der Hoffnung den Durchbruch zu schaffen. Man war optimistisch, glaubte an den Erfolg des Tokamaks als Fusionsreaktor. Es gelang wohl bessere Reaktoren zu bauen, gleichzeitig traten aber auch neue Instabilitäten auf. Noch mehr Forschung war notwendig. Schließlich erreichten die Anlagen eine Dimension, bei der eine internationale Zusammenarbeit unabdingbar war. Das Ergebnis war **ITER**. ITER ist das bisher größte Projekt, das einen Tokamak als Fusionsanlage verwendet und wird im nächsten Kapitel besprochen. Dieses Kapitel hingegen widmet sich der Fusionsforschung abseits von ITER und erzählt die Entdeckungen, Herausforderungen und Errungenschaften der letzten 40 Jahre.

Bessere Anlagen

Mit Beginn der 1970er Jahre wurden die USA zu einem Spitzenreiter im Rennen um Fusion. Das Princeton Plasmaphysiklabor war sehr kreativ, was das Lösen von Problemen im Zusammenhang mit Plasmaheizung betraf. Gegen Ende der 1970er Jahre heizte der Tokamak PLT (Princeton Large Torus) ein Plasma bis zu 60 Millionen Grad Celsius. Zu jener Zeit übertraf das den Rekord des sowjetischen T-3 um das Achtfache.

Es zeigte sich, dass es möglich war, Fusionstemperaturen zu erreichen, da ab Temperaturen zwischen 50 und 100 Millionen Grad Celsius die Fusionsreaktionen das Plasma heizen konnten. Damit war es möglich, die erforderlichen 150 Millionen Grad Celsius zu erreichen. PLT setzte einen wichtigen Meilenstein in der Fusionsforschung, konnte jedoch nicht lang genug ein Plasma einschließen, um durch interne Heizung noch höhere Temperaturen zu

erreichen. Damals stand der USA ein großes Budget für Fusionsforschung zur Verfügung, was auch die Spitzenposition in der Fusionsforschung erklärte. So betrug das jährliches Fusionsbudget der USA ungefähr 25 Millionen Dollar. Die Kosten für den Bau eines Tokamaks betragen zu dieser Zeit rund 500 000 Dollar.

Ein Grund, warum die USA eine große Summe Geld für alternative Energiequellen ausgaben, war die Ölkrise von 1973. Damals verhängten ölbereiche Länder des Nahen Ostens ein Ölembargo gegen Länder, die Israel politisch unterstützten. Die USA wurden am schwersten getroffen, da sie stark auf Öl angewiesen waren. Um in Zukunft die Abhängigkeit von Öl zu reduzieren, erhöhten die USA die Finanzmittel, um alternative Energiequellen zu finden.

In diesem Zeitraum fällt auch die Entwicklung besserer Magnete. Während des 20. Jahrhunderts wurden Supraleiter erforscht und entwickelt. Diese Supraleiter konnten für den Bau von Elektromagneten verwendet werden. Gegen Ende der 1970er Jahre war die Entwicklung der Supraleiter so weit fortgeschritten, dass sie in Fusionsreaktoren eingesetzt werden konnten. Der sowjetische **T-7** war der erste Fusionsreaktor, in dem supraleitende Magnete zum Einsatz kamen.

In diesem Zeitraum wurde auch das Design des Tokamaks weiterentwickelt. Eine als Doublette bezeichnete Konstruktion benutzte **D-förmige** Magnete,

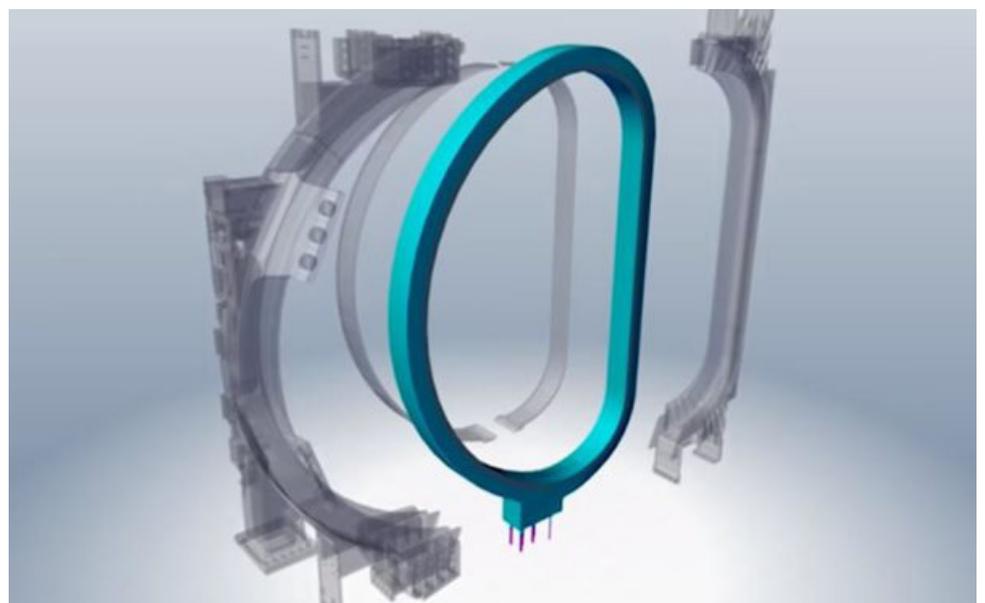


Abbildung 2.10. Die Form der Spule ähnelt dem Großbuchstaben D, mit gerundeten Ecken. Die Änderung der Form gegenüber einem kreisförmigen Querschnitt macht das Plasma in einem Tokamak stabiler.

wodurch der Plasmaquerschnitt ebenfalls D-förmiger wurde. Da man dadurch eine kleine Gruppe von Instabilitäten leichter vermeiden konnte, war auch ein Betrieb bei höheren Dichten möglich

Größere Plasmen

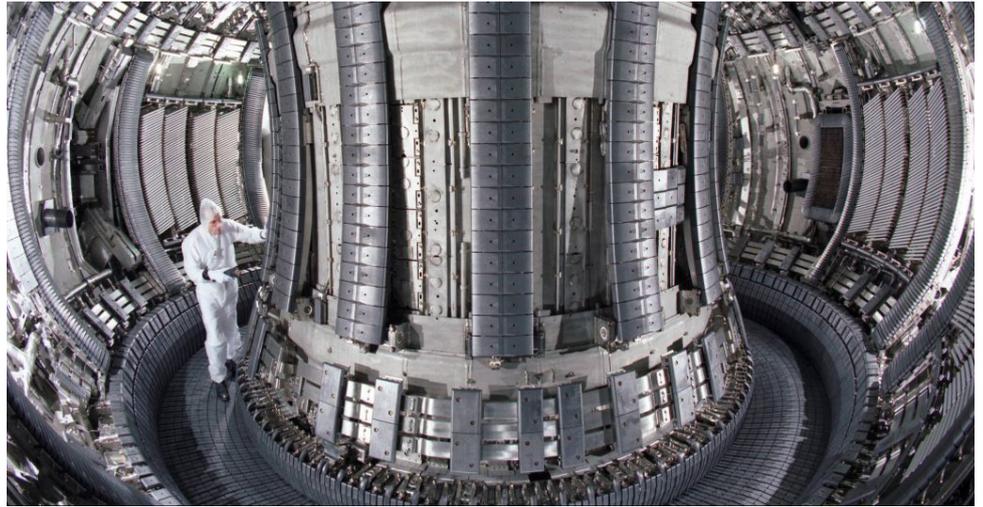
Zu diesem Zeitpunkt waren alle Voraussetzungen für einen funktionsfähigen Fusionsreaktor erfüllt. In unterschiedlichen Anlagen konnten entscheidende Verbesserungen erzielt werden. Als nächstes musste eine große Anlage gebaut werden, die die neue Bauweise mit den verbesserten Magneten und den Heizverfahren berücksichtigte. Die Maschine sollte auch deshalb über ein größeres Plasmavolumen verfügen, da es bei größerem Volumen einfacher ist, die Kerntemperatur eines Fusionsplasmas zu erhöhen.

Das sieht man am besten, wenn man das Volumen des Plasmas mit seiner Oberfläche vergleicht. In einem Fusionsplasma ist die mögliche Dichte des Plasmas begrenzt. Nehmen wir deshalb für den Moment an, die Dichte des Plasmas sei konstant. Wenn man die Größe des Reaktors erhöht, vergrößert sich auch das Volumen des Plasmas. Die Anzahl der stattfindenden Fusionsreaktionen ist abhängig vom Volumen des Fusionsplasmas. Je größer das Volumen, desto mehr Wasserstoff und desto mehr Fusionsreaktionen, die zur selben Zeit stattfinden können. Das bedeutet, die **Fusionsleistung** hängt direkt vom Volumen des Plasmas ab.

Indessen hängt die Verlustleistung von der Plasmaoberfläche ab. Die Vergrößerung eines Plasmas führt zu einer Vergrößerung seiner Oberfläche. Während also die Fusionsleistung steigt, steigt auch die Verlustleistung. Wesentlich ist hier, dass das Volumen des Plasmas stärker zunimmt als seine Oberfläche. Wenn folglich die Größe zunimmt, steigt die Fusionsleistung schneller als die Verlustleistung. Damit steigt auch die Kerntemperatur des Plasmas.

Allerdings führt die höhere Kerntemperatur zu einem verstärkten Leistungsverlust, denn Körper mit einer im Vergleich zur Umgebungstemperatur höheren Temperatur kühlen schneller ab. Schließlich stellt sich

Abbildung 2.11. Ein Techniker an der Arbeit in der Plasmakammer des JET. Jet ist derzeit der größte in Betrieb befindliche Tokamak. Er hält die Rekorde für die größte produzierte Fusionsleistung und den höchsten Q-Faktor.



ein Gleichgewichtszustand zwischen der im Plasma erzeugten Fusionsleistung und der Verlustleistung bei höherer Kerntemperatur ein.

Nationale Großanlagen

Verschiedene Länder begannen ihre eigenen großen Anlagen zu bauen in der Hoffnung die ersten zu sein, die den **Breakeven** schaffen oder sogar überschreiten. Unter Breakeven versteht man, wenn die gleiche Menge an Energie durch Fusionsreaktionen erzeugt wird, wie zum Heizen des Plasmas benötigt wird. Ein Indikator, wie gut ein Fusionsreaktor arbeitet, ist der **Q-Faktor**. Der Q-Faktor ist das Verhältnis der durch die Fusion erzeugte Leistung zur Heizleistung. Der Breakeven kann damit mit $Q = 1$ gleichgesetzt werden.

Die USA beendeten den Bau ihres größten Tokamaks 1982 und nannten ihn **Tokamak Fusion Test Reactor** (TFTR). Er ähnelte einer größeren Version des PLT. Ursprünglich hatte dieser Tokamak keine D-förmigen Spulen, da die Vorteile D-förmiger Spulen zum Zeitpunkt seiner Entwurfsphase nicht bekannt waren. Japan baute ein vergleichbares Gerät. Der japanischer Torus-60 oder JT-60 war mit D-förmigen Spulen ausgestattet und wurde im Jahr 1985 fertiggestellt.

Verschiedene Länder in Europa hatten nicht die finanziellen Mittel zur Verfügung ein Gerät dieser Größe zu bauen. Aus diesem Grund beschlossen sie die gemeinsame Finanzierung eines Tokamaks. Sie

schlossen sich zusammen und 1983 wurde der **Joint European Torus** (JET) fertiggestellt. Seit dieser Zeit ist JET der größte in Betrieb befindliche Tokamak. JET wurde auch mit D-förmigen Spulen ausgestattet, obwohl die Vorteile des „Plasmaformens“ den Konstrukteuren noch nicht bekannt waren. Die Entscheidung für D-förmige Spulen bot auch konstruktionstechnische Vorteile. So wurde es leichter die Spulen auf der Innenseite eines zentralen Pfeilers zu montieren, auch die Kräfte auf die Spulen konnten besser verteilt werden. Die Sowjetunion baute ebenfalls eine große Maschine, ihr T-15 wurde 1988 fertiggestellt. Man hoffte mit diesen Maschinen den Breakeven zu erreichen. Aber die ersten Testläufe zeigten Resultate, die gelinde gesagt enttäuschend waren. TFTR erreichte beispielsweise nur einen Q-Faktor von 0,2, obwohl seine Konstruktion abzielte einen Faktor um 1 zu erreichen. Neue Instabilitäten tauchten auf, die in weniger leistungsfähigen Anlagen nicht beobachtet wurden.

Forscher hatten verschiedene Lösungen für verschiedene Probleme gefunden. Allerdings wurde zunehmend klar, dass man nur mit bedeutend größeren Anlagen auf dem Weg zur Fusionsenergie erfolgreich sein konnte. Fusion würde sich also wieder um einige Jahrzehnte verzögern. Die Zweifel, jemals erfolgreich zu sein, waren groß. Glücklicherweise hatten Gespräche begonnen, einen sehr großen Reaktor in internationaler Zusammenarbeit zu bauen. Aber wie im nächsten Kapitel zu lesen ist,

Klassenaufgabe 2.4

Ein großer Unterschied zwischen Stellaratoren und Tokamaks ist die Brenndauer des Plasmas. In modernen Stellaratoren können Plasmen bis zu 30 Minuten betrieben werden. Hingegen sind Tokamaks durch ihre Pulsdauer limitiert. Die Pulsdauer kann berechnet werden über $t_{\text{pulse}} = (\Psi - L_p I_p) / V_{\text{loop}}$. Ψ ist hier der verfügbare magnetische Fluss, L_p ist die Induktivität des Plasmas (ein Maß, wie stark das Plasma auf ein Magnetfeld reagiert), I_p ist der benötigte Plasmastrom und V_{loop} ist die für den Plasmastrom notwendige Spannung. Die Werte dieser Größen sind für ITER unten angeführt. Wie lange dauern die Pulse bei ITER?

$$\Psi = 250 \text{ Vs}$$

$$L_p = 12.5 \text{ } \mu\text{Vs/A}$$

$$I_p = 16 \text{ MA}$$

$$V_{\text{loop}} = 0.1 \text{ V.}$$

Randbemerkung Moderne Stellaratoren

Während Tokamaks in der Fusionsgemeinschaft die größte Bedeutung erlangt haben, bedeutet es nicht, dass es keine Weiterentwicklung bei anderen Anlagen gegeben hat. Auch bei Stellaratoren wurden Fortschritte erzielt. Die Weiterentwicklung der Computer war für Stellaratoren außerordentlich hilfreich, da mithilfe von Software das äußerst komplexe Design optimiert werden kann. Das hat die Tür zu großen Stellarator-Projekten geöffnet. Der derzeit größte in Betrieb befindliche Stellarator ist Wendelstein 7-X. Er besteht aus 50 Spulen, die zu verschiedene Formen verbogen und verdrillt sind. In der Abbildung unten ist die Spulenanordnung blau dargestellt. Die theoretische Form des Plasmas ist gelb. Wie man sieht, schaut dies wesentlich komplizierter aus als die „einfache“ Donut-Form eines Tokamaks.

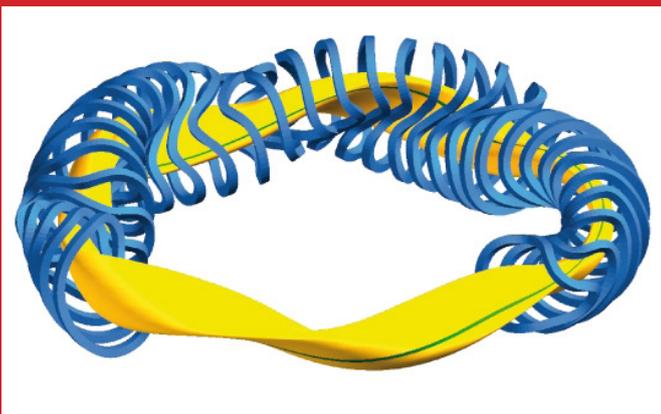


Abbildung 2.12. Schematische Darstellung von Wendelstein 7-X. Die Spulen sind blau eingezeichnet, die Form des Plasmas ist gelb dargestellt. Die grüne Linie auf der gelben Oberfläche ist eine magnetische Feldlinie. Quelle: Max Planck Institute for Plasma Physics.

zogen sich die Verhandlungen über viele Jahre. Auf die Fertigstellung des Baus dieser Maschine wird noch immer gewartet. Inzwischen beschäftigte sich die Fusionsgemeinschaft weiter mit den Erkenntnissen und der Technologie der Fusion und mehrere Rekorde wurden aufgestellt.

Rekorde werden gebrochen

Bis in die 1990er Jahre wurde Tritium in keinem Fusionsexperiment verwendet. Ein Deuterium-Tritium (D-T) Gemisch hat als Brennstoff deutlich günstigere Eigenschaften als reines Deuterium. Allerdings ist die

Arbeit mit Tritium aufgrund seiner Materialeigenschaften schwierig und entsprechend hoch sind die Kosten. Dennoch wird ein D-T Gemisch gegenwärtig als einzige Option gesehen Nettoenergie zu produzieren. Tritium ist ein Betastrahler mit einer Halbwertszeit von ca. 12 Jahren. Mehr Informationen, warum die Eigenschaften von Tritium seine Handhabung schwierig machen, findest du in Modul 5. JET war der erste Tokamak, in dem ein D-T Gemisch zum Einsatz kam. Der erste Rekord damit gelang aber 1994 dem amerikanischen TFTR mit 10,7 MW Fusionsleistung. TFTR war damals mit D-förmigen Spulen aufgerüstet worden. 1995 erreichte TFTR eine Rekordtemperatur von 510 Millionen Grad Celsius. Diese Rekorde hielten aber nicht lange, denn 1996 produzierte der japanische JT-60 ein Plasma mit 522 Millionen Grad Celsius. JET erzeugte ein Jahr später mit einem 50:50 D-T Gemisch 16 MW thermische Leistung bei einer externen Heizleistung von 24 MW. Nicht nur, dass JET einen Weltrekord für die höchste mit ihm erzeugte Fusionsleistung erzielte, gelang mit 0,67 auch ein Weltrekord für den höchsten Q-Faktor.

Diese außergewöhnlichen Ergebnisse konnten sowohl im TFTR als auch im JET nur aufgrund der Heizung durch die bei der Fusionsreaktion erzeugten **Alphateilchen** erzielt werden. Die Alphateilchen tragen 20% der bei der Fusionsreaktion erzeugten Energie. Da Alphateilchen geladen sind, werden sie wie das D-T Gemisch durch das Magnetfeld eingeschlossen. Damit können sie durch Stöße ihre Energie auf das Plasma übertragen und so das Plasma zusätzlich aufheizen. Dadurch wird die erforderliche Heizung durch externe Quellen reduziert. Während des Rekordversuchs von JET lieferten die Alphateilchen 3,2 MW thermische Leistung. Es ist nicht zu erwarten, dass die Rekorde von JET bis zur Fertigstellung von ITER eingestellt werden. So konnte JT-60 zur selben Zeit wohl Plasmabedingungen schaffen, die theoretisch ein Q von 1,25 erlauben würden, aber JT-60 benutzte kein D-T Gemisch. Da Tritium im JT-60 nicht eingesetzt werden kann, wird der theoretisch mögliche Q-Wert von 1,25 auch nicht erzielt werden können. Dennoch sind die Leistungen von JT-60 beeindruckend.

Ungefähr zwei Jahrzehnte später, im Jahr 2013, stellte JT-60 einen weiteren Weltrekord auf, den für das höchste **Dreifachprodukt**. Das Dreifachprodukt ist das Ergebnis der Multiplikation dreier Faktoren: Plasmadichte, Plasmatemperatur und Energieeinschlusszeit. Es ist ein guter Indikator für die Leistungsfähigkeit eines Reaktors. In diesem Zeitraum hatten die Chinesen auch den Bau eines großen Tokamaks mit dem Namen **EAST** fertiggestellt. Mit diesem Tokamak wurden drei Weltrekorde aufgestellt. EAST hält den Weltrekord für den längsten stabilen Betrieb und das höchste Produkt aus Einschlusszeit und Temperatur. Der beiden ersten Rekorde gelangen 2017, als 101,2 Sekunden lang ein stabiles Plasma betrieben wurde. Ein weiterer Rekord folgte 2021. Über 100 Sekunden konnte ein Plasma mit einer Temperatur von 120 Millionen Grad Celsius eingeschlossen werden.

Randbemerkung Alpha, Beta und Gamma

Wenn Physiker von Strahlung sprechen, meinen sie oft radioaktive Strahlung. Es gibt drei Formen radioaktiver Strahlung: Alpha, Beta oder Gamma. Bevor Wissenschaftler vollständig verstanden, woraus diese Strahlung bestand, konnten sie die Strahlung aber bereits unterscheiden. Sie beobachteten, dass es Unterschiede in der Abschirmung gab und dass die Energie dieser Strahlung unterschiedlich absorbiert wurde. Später entdeckte man, woraus die Strahlung bestand.

Gammastrahlung besteht aus elektromagnetischen Wellen, so wie Licht. Aber Gammastrahlung ist zu energiereich, als dass unsere Augen sie wahrnehmen können. Betastrahlung besteht aus Elektronen, die sich sehr schnell bewegen. Alphastrahlung sind Teilchen hoher Geschwindigkeit, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen. Da es sich dabei um ein Helium-4 Atom ohne Elektronen handelt, wird ein vollständig ionisiertes Helium-4 Atom oft als Alphateilchen bezeichnet.

In den USA ist aktuell ein Tokamak mit dem Namen SPARC im Bau. **SPARC** soll einen neuen Typ supraleitender Spulen verwenden. Diese Spulen werden mehrere verschiedene Eigenschaften haben, die sich von den in den gegenwärtigen Maschinen verwendeten Supraleitern unterscheiden werden. So können die Spulen noch größere Ströme transportieren und damit noch größere Magnetfelder erzeugen. Stärkere Magnetfelder verbessern die zu erwartende Fusionsleistung. Die Spulen können auch bei höheren Temperaturen betrieben werden. Bei höheren Temperaturen würden die Stromstärken aber niedriger ausfallen und damit auch die Magnetfelder weniger stark sein. Das ist insofern von Bedeutung, da das Kühlen der Supraleiter einer der kostspieligsten Faktoren beim Betrieb eines Fusionsreaktors ist. Bei vielen Anlagen werden sehr wahrscheinlich keine Supraleiter eingesetzt werden. Die Kosten zur Kühlung würden den Mehrwert an stärkeren Magnetfeldern nicht aufwiegen.

Wenn du mehr über Supraleiter lernen möchtest, beschäftige dich auf jeden Fall mit Modul 4. Erwähnenswert bei SPARC ist weiters, dass er nicht aus öffentlichen Mitteln, sondern von privaten Investoren finanziert wird.

2.4

ITER

Wenn man heute von Fusion spricht, wird ITER wohl im selben Zug genannt werden. ITER ist als Tokamak konzipiert. Wenn die Anlage fertig gebaut ist, wird ITER bis dato der größte Tokamak sein. ITER wird in internationaler Zusammenarbeit hergestellt, 35 Nationen sind im Bau involviert. Die weltgrößten Plasmaphysikexperimente werden mit ITER ausgeführt werden. Dieses Kapitel beginnt mit der Geschichte von ITER und erläutert dann die Ziele, die ITER erreichen soll.

Klassenaufgabe 2.5

ITER ist ein gutes Beispiel für die Vorteile, aber auch Herausforderungen, die ein Projekt mit sich bringt, in dem viele beteiligt sind. Diskutiert die folgenden Fragen in Kleingruppen

- (a) Welche Vorteile siehst du?
- (b) Welche Herausforderungen siehst du?

Inmitten des Kalten Krieges

1973 erörterten Richard Nixon und Leonid Breschnew erstmals die Idee eines internationalen Fusionsreaktors. Aber erst 1978 kam es mit dem Projekt **INTOR** zu einem ersten Versuch internationaler Zusammenarbeit. Neben den USA und der Sowjetunion waren Japan und Euratom als Vertreter Europas an dem Projekt beteiligt. Der Kalte Krieg verhinderte jedoch eine effektive Zusammenarbeit zwischen den INTOR Partnern, sodass kein wirklicher Fortschritt erzielt wurde. Die Dinge änderten sich im Jahr 1985. Michail Gorbatschow war gerade an die Spitze der Kommunistischen Partei der Sowjetunion gewählt worden. Er war einer Zusammenarbeit mit dem Westen nicht abgeneigt, in der Hoffnung die stagnierende Wirtschaft der Sowjetunion in Schwung zu bringen. 1985 trafen Gorbatschow und US-Präsident Ronald Reagan einander auf einem Gipfeltreffen in

Genf. Sie waren in vielen Dingen nicht derselben Meinung und viele glaubten, dass das Gipfeltreffen ein Misserfolg war. Aber beide Staatsmänner wurden von ihren Wissenschaftlern angewiesen, den Bau eines internationalen Fusionsreaktors voranzutreiben, da sie voraussahen, dass die Kosten eines funktionierenden Fusionsreaktors das Budget eines einzelnen Landes übersteigen würden. Wissenschaft und das Streben nach Erkenntnissen haben sich öfters als Mittel entpuppt, friedliche internationale Zusammenarbeit zu fördern. Andere wissenschaftliche Projekte im 20. Jahrhundert, die friedliche Zusammenarbeit förderten (und noch immer fördern), sind CERN und die internationale Raumstation ISS.

1986, wurde ein neues Abkommen zwischen den ursprünglichen INTOR Partnern unterzeichnet und eine Gesellschaft gegründet, die die Aufsicht über das Projekt übernehmen sollte. Die Planungen begannen und der Name zu ITER geändert. Der Name ITER war ursprünglich ein Akronym (International Thermonuclear Experimental Reactor), bedeutet aber auch „der Weg“ auf Latein, ein Symbol, da dieser Reaktor den Weg zur Fusionsenergie ebnen wird. 1990, ein Jahr nach Ende des Kalten Krieges, war der Entwurf fertiggestellt. 1992 wurden die technologischen Ziele festgelegt. Die technische Planung war 1998 abgeschlossen. Man konnte sich aber weder auf einen Standort noch auf die Art der Finanzierung einigen.



Abbildung 2.13. Michail Gorbatschow und Ronald Reagan.

Klassenaufgabe 2.6

ITER ist eine sehr große Anlage, aber wie groß ist ITER tatsächlich? Du findest viele Details zur Maschine auf der Webseite von ITER: <https://www.iter.org/factsfigures>. Hier kannst du auch lesen, dass der Innenteil des Torus, in dem sich das Plasma befindet, ein Volumen von etwa 830 Kubikmeter hat. Hast du eine Vorstellung, wie groß das ist?

(a) Wie viele Personen hätten in ITER Platz? Eine Person hat ein Volumen von etwa 65 Liter

(b) Wie viele Elefanten hätten in ITER Platz? Ein Elefant hat ein Volumen von etwa 47 m³?

Verhandlungen benötigen Zeit

1999 hatten die USA genug von den politischen Diskussionen und verließen das ITER Projekt. Mit dem FIRE Projekt versuchten sie ohne internationale Zusammenarbeit Fusionsforschung voranzutreiben. Kanada wurde neues Mitglied, musste aber zwei Jahre später ITER aufgrund von Finanzierungsproblemen verlassen. Die USA hingegen kehrten zu ITER zurück, nachdem sie erkannt hatten, wie schwierig es war alleine Fortschritte zu erzielen.

Im selben Jahr traten mit China und Südkorea zwei weitere Mitglieder bei. Indien folgte als aktuell letztes Mitglied 2005. Seit 2001 wurde über den Standort für den Reaktor verhandelt. 2005 standen nur mehr zwei Optionen zur Wahl, Rokkasho in Japan und Cadarache in Frankreich. Schließlich wurde ein Abkommen getroffen. Cadarache wurde als Standort ausgewählt. Japan wurden im Gegenzug 20% der Fertigungsaufträge und Forschungsposten zugesprochen, während die Beteiligung nur 10% betrug.

2006 unterzeichneten die Projektteilnehmer den endgültigen Vertrag. Damals lagen die geschätzten Kosten bei 5,9 Milliarden Euro bezogen auf einen Zeitraum von 10 Jahren. Aber im Jahre 2008 war eine Überprüfung des Baus notwendig, die neuen geschätzten Kosten stiegen auf ungefähr 19 Milliarden Euro für eine Periode von 10 Jahren. Einer der Gründe für die gestiegene Kostenschätzung waren stark gestiegenen

Materialkosten. Beispielsweise waren die Kosten für Beton zwischen den beiden Überprüfungen um 50% gestiegen. Nach der letzten Kostenschätzung im Jahr 2016 könnten die Gesamtkosten auf bis zu 22 Milliarden Euro steigen. Forscher scherzen gerne, dass ITER eines der kostspieligsten Experimente sein würde, aber für eine Friedensprojekt ist es noch immer vergleichsweise billig.

Sachleistungen

Da die Wirtschaftsleistung der teilnehmenden Länder nicht vergleichbar ist und aufgrund der langen Laufzeit des Projekts mit starken Schwankungen der Materialkosten zu rechnen war, sollten die Beiträge in Form von Sachleistungen erbracht werden. Statt Geld zur Verfügung zu stellen, würden die Länder eine vereinbarte Anzahl von Komponenten, Materialien und Arbeitskräfte liefern.

In Verhandlungen wurde geklärt, welche Partner welche Ressourcen liefern sollten. Die Verteilung der Ressourcen war politisch motiviert. Beispielsweise liefern nicht nur ein oder zwei Länder Teile für die Toroidalfeldspulen, sondern mit China, Euratom, Japan, Südkorea, Russland und die USA gleich sechs Partner. Aus technischer Hinsicht bedeutet dies eine Verkomplizierung des Projekts, da die von unterschiedlichen Partnern gebauten Teile anschließend perfekt zusammenpassen müssen. Liegen Entwurf und Bau einer Komponente in einer Hand, verringert sich die Fehleranfälligkeit. Der Bau der Komponenten begann 2008. Alle großen Komponenten sollten bei ITER bis 2023 eingelangt sind.

Die Bauarbeiten sind voll im Gang

Inzwischen ist der Bau von ITER in vollem Gang. Im Zeitraum von 2007 bis 2009 wurde der Untergrund gerodet und geebnet. Das Fundament und die Stützkonstruktion für die Bodenplatte wurden zwischen 2010 und 2014 errichtet. ITER ist erdbebensicher konzipiert. Die Konstruktion ist darauf ausgelegt, einem Erdbeben standhalten zu können, das die 40-fache Amplitude und das 250-fache an Energie des stärksten je in dieser Umgebung aufgezeichneten Erdbebens hat.

Der Bau des Hauptgebäudes und der Nebengebäude war 2021 abgeschlossen.

Nachdem die Bauarbeiten nun größtenteils abgeschlossen sind, müssen im nächsten Schritt die einzelnen Teile zu einer fertigen Anlage montiert werden. Die Hauptmontage begann im März 2020, ein Jahr später waren der Bau und die Montagearbeiten zu 74,5% abgeschlossen. Aufgrund der Covid-Pandemie hat sich das Projekt nun ungefähr um ein Jahr verzögert.

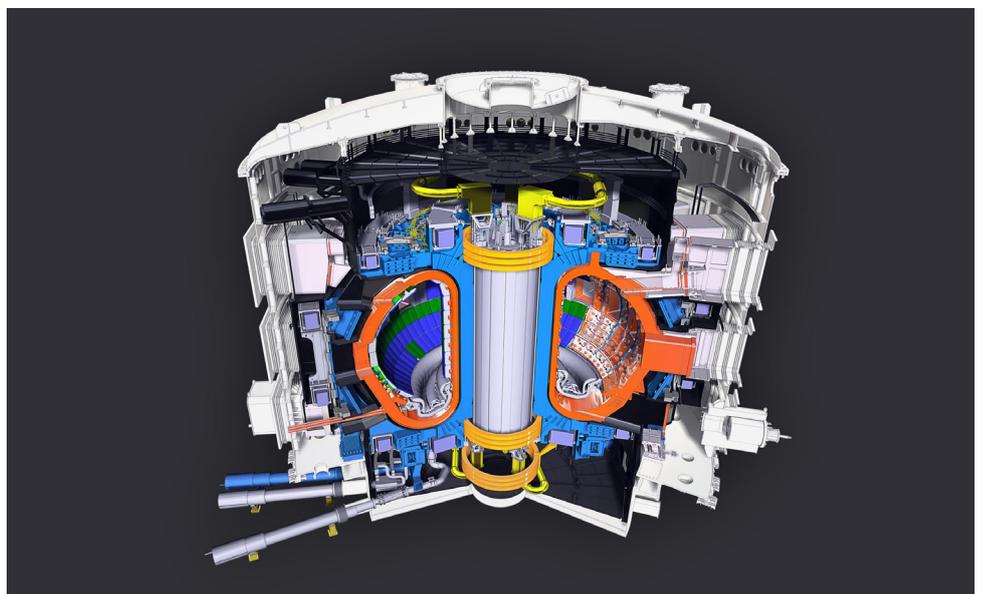
Die neue Planung sieht nun vor, dass der Torus im Laufe des Jahres 2022 fertiggestellt sein soll, der Kryostat (Kühlteil) 2024. Mit der Integration der letzten Systeme soll der Reaktor nach einem weiteren Jahr bereit zur Erzeugung eines Plasmas sein. Das wird wahrscheinlich im Dezember 2025 der Fall sein. Zu Beginn wird kein Deuterium-Tritium Gemisch als Brennstoff eingesetzt,

Klassenaufgabe 2.7

2012 wurde ITER als Nuklearanlage klassifiziert. Bei der Fusion von Deuterium und Tritium entsteht Helium-4 und ein Neutron. Weder Helium-4 noch Neutronen sind radioaktiv.

Warum ist ITER als Nuklearanlage klassifiziert?

Abbildung 2.14.
Visualisierung des Querschnitts von ITER. Die Umrandung des Vakuumgefäßes ist orange eingefärbt. Das Vakuumgefäß hat ein Volumen von 830 Kubikmeter. Für den gesamten Reaktor benötigt man ein 73 m hohes Gebäude. Der Triumphbogen in Paris ist niedriger.



da einige Testläufe mit einfacheren Plasmen notwendig sind, um die Maschine kennenzulernen. Erst ab 2035 soll mit Deuterium-Tritium-Gemischen experimentiert werden. Die Experimente sollen bis 2050 dauern.

Die Ziele von ITER

Dieser Abschnitt widmet sich den Zielen, die die Forscher mit ITER zu erreichen hoffen.

Das eigentliche Ziel von ITER ist den Breakeven zu überschreiten. Wie im letzten Kapitel besprochen, wurden JET und TFTR mit der Hoffnung entworfen, $Q = 1$ zu erreichen. ITERs Bauweise zielt hingegen ab, mindestens

$Q = 10$ zu erreichen. Mit einer Heizleistung von 50 MW soll eine Fusionsleistung von 500 MW erzeugt werden.

ITER ist kein Kraftwerk. Es ist nicht konzipiert, Fusionsenergie in elektrische Energie umzuwandeln. Das wird die Aufgabe der zukünftigen DEMO Reaktoren sein, die in Modul 5 erklärt werden. Aber allein das Erreichen eines Q -Faktors größer als 1 würde einen Meilenstein in der Fusionsforschung bedeuten. Das erste Mal überhaupt würde Nettoenergie in einem Fusionsreaktor erzeugt werden. Auch auf dem Gebiet der Plasmaforschung wird man neue Wege beschreiten.

In kleineren Reaktoren wird das Plasma durch externe Quellen geheizt. Aber wie im vorigen Kapitel erwähnt, können die bei der Fusionsreaktion erzeugten Alphateilchen (Heliumkerne) das Plasma zusätzlich heizen. Wenn ITER ein Q deutlich über 1 erreicht, wird das Plasma in erster Linie über Alphateilchen geheizt. **Wie das Heizen mit Alphateilchen das Plasmaverhalten beeinflusst**, muss noch erforscht werden. ITER soll diese Forschung ermöglichen. Besonders die Art und Weise, **wie sich Instabilitäten entwickeln** und wie sie unter diesen Bedingungen **kontrolliert** werden können, ist ein wichtiges Forschungsziel.

Mit ITER wird es möglich sein, Komponenten und Materialien unter Bedingungen, wie sie in einem Fusionskraftwerk herrschen werden, zu testen. Wichtige Bauelemente, die unter diesen Bedingungen noch nicht getestet wurden, sind der **Divertor**, die **erste Wand**,

und die **Abdeckung (Blanket), die zur Erzeugung („breeding“) des Tritiums** dient. Diese Komponenten werden ausführlich in Modul 4 besprochen.

Das Testen des Blankets ist eine der wichtigsten Aufgaben. Tritium kommt nicht in der Natur vor und muss deshalb im Reaktor erzeugt werden.

Schließlich soll ITER beweisen, dass **Kernfusion von Natur aus sicher** ist. Nur, wenn es zu zeigen gelingt, dass der Betrieb eines Fusionsreaktors und damit auch der eines Fusionskraftwerks vernachlässigbare Auswirkungen auf die Umwelt hat, wird Fusion Zukunft haben. Beteuerungen der Wissenschaftler, dass Fusion funktioniert und sicher ist, genügen nicht. Die Gesellschaft muss überzeugt werden. Das gelingt nur mit einem erfolgreichen Projekt, in dem nicht nur die wissenschaftliche Forschung einen großen Schritt nach vorne macht, sondern in dem auch gezeigt wird, dass Fusion von Natur aus sicher ist. Nur, wenn es gelingt, die Ziele von ITER zu erreichen, wird Fusion ein nachhaltiges positives Image in der Gesellschaft hinterlassen.

Zusammenfassung

In diesem Modul wurde die Geschichte der Fusionsforschung erzählt. Es begann mit der Entdeckung der Fusionsreaktionen als Energiequelle der Sonne und den ersten Versuchen, Fusion auf der Erde nachzumachen. Von unterschiedlichen Konzepten, die sich die Forscher ausgedacht hatten, wurde erzählt, auch vom Zweifel der Forscher, ob Fusion jemals gelingen wird. Die Entwicklung begann mit Reaktoren in table-top Größe. Die Reaktoren wurden immer größer, nun ist man bei ITER angelangt. Auf dem Weg zur Fusion gehören neben den Errungenschaften auch verschiedene Herausforderungen, seien sie physikalischer Natur, wie das Problem der Drift, oder politischer Natur, wie der Interessensausgleich.

Wie sieht die Zukunft aus? ITER wird Meilensteine auf dem Gebiet der Fusionsforschung setzen. Es mag Situationen geben, die wieder Zweifel an einem Erfolg nähren, aber auch Situationen, die den Proz-

ess vorantreiben werden. Wenn alle Herausforderungen gemeistert wurden, wird Fusion nicht aufzuhalten sein. ITER ist nur ein kleiner, wenn auch bedeutender Beitrag in der Geschichte der Fusionsforschung.

Nach ITER wird die Forschung weitergehen. Diese wird nicht nur die Physik oder die Materialwissenschaften betreffen. Wenn du dich für die Zukunft der Fusion interessierst, solltest du Modul 5 lesen. Wenn du mehr über Fusionsreaktoren lernen möchtest, stehen dir die Module 3 und 4 zur Verfügung.

Weiterführendes

Andere Module

FuseNet hat in Summe fünf Module entwickelt, die die Fusionsforschung aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchten. Besuche die Webseite, um mehr über die vier anderen Module zum Thema (1) Fusionsgrundlagen, (3) Plasmakontrolle, (4) Fusionsmaterialien und (5) Einsatz zu lernen.

Du findest die FuseNet Unterrichtsmaterialien unter <https://fusenet.eu/education/material>

Online Quellen

Wenn du mehr über die Anlagen und Konzepte, die in diesem Modul besprochen wurden, lernen möchtest, stehen dir folgenden Webseiten zur Verfügung:

https://www.youtube.com/watch?v=0hyEtr_EhVU. Die Geschichte der Fusion wird von Fusionswissenschaftlern erzählt, die Teil dieser Geschichte waren.

<https://www.iter.org>. Die offizielle Webseite von ITER. Es wird über aktuelle Entwicklungen von ITER und in der Fusionsforschung berichtet. Die ITER-Anlage kann auch virtuell besucht werden.

https://www2.ipp.mpg.de/ippcms/eng/externe_daten_en/panoramaw7x/. Ein virtueller Besuch von W7-X.

https://www.ipp.mpg.de/1727365/zeitraffer_w7x. Ein kurzer Videoclip über den Bau von W7-X.

<https://www.iter.org/newsline/-/3033>. Ein Artikel über die Wiederverwendung von Fusionsanlagen.

<https://www.iter.org/newsline/-/932>. Ein Artikel, wie die für ITER entwickelten Technologien für Komponenten in der Luftfahrt benutzt werden.

Anmerkungen

Der Weg zur Fusion ist das zweite von fünf Modulen zum Thema Kernfusion. Die Module sind für den Unterricht in der Sekundarstufe vorgesehen. Alle Module sind kostenlos auf der Webseite von FuseNet verfügbar, <https://fuset.net>.

Autor

Arno Claassen

Herausgeber

Sander Korteweg and Sjoukje
Tijmensen-Hoekstra

Grafisches Design

Jens Peter Frankemölle

Titelbild

Public domain/author unknown

Herausgeber

FuseNet

Finanzielle Unterstützung

Dieses Projekt wurde durch EUROfusion finanziell unterstützt.

This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

