

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 74 (2017)

Artikel: Die Kernfusion : auf dem Weg zu einer alternativen Energiequelle
Autor: Martin, Yves / Fasoli, Ambrogio / Manke, Fabian
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-738060>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

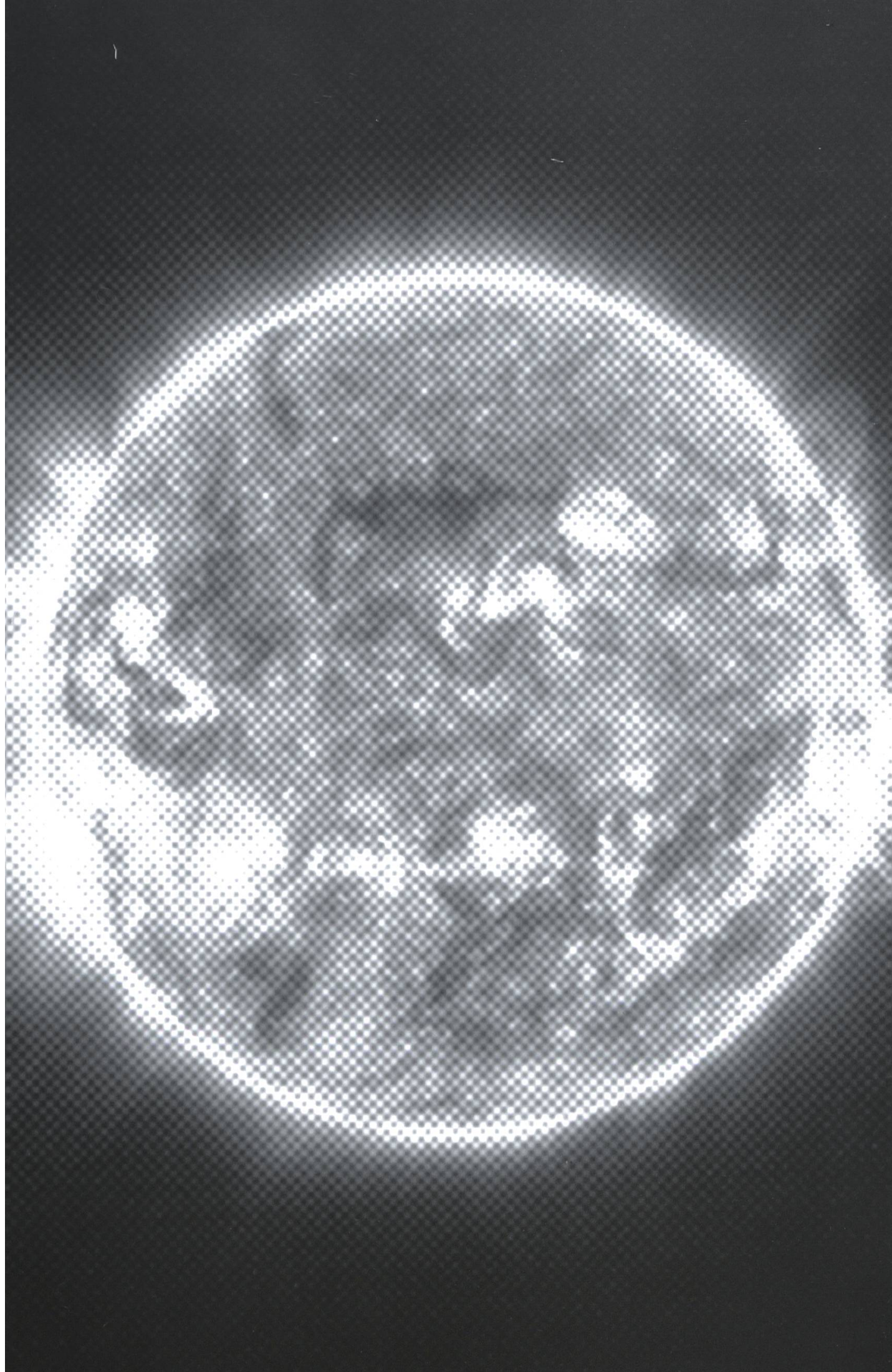
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.03.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



YVES MARTIN¹, AMBROGIO FASOLI¹, FABIAN MANKE¹, CHRISTIAN THEILER¹

Die Kernfusion – Auf dem Weg zu einer alternativen Energiequelle

Zusammenfassung des Vortrags von C. Theiler vom 22.11.2016²

Die Kernfusion gilt als nahezu unerschöpfliche, sichere und umweltfreundliche Energiequelle. Im Gegensatz zur Kernspaltung werden bei dieser Technik leichte Kerne zur Bildung von schwereren verwendet. Während diese Technologie enorme Vorteile bietet, ist ihre Entwicklung gleichzeitig mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, insbesondere im Hinblick auf die Stabilisierung und den effizienten Einschluss von den für die Fusion notwendigen, 100 Mio. °C heissen Plasmas. Es folgt eine kurze Vorstellung der Prinzipien der Fusion, des heutigen Standes der Forschung sowie der zukünftigen Entwicklung.

Die wissenschaftliche Gemeinschaft rund um die Kernfusion hat sich zum Ziel gesetzt, noch vor 2050 Strom aus dieser Energiequelle zu erzeugen. In ihrem «Fahrplan» werden die drei Etappen-Ziele beschrieben, die zur irdischen Nutzung der Kernfusion erreicht werden müssen: 1) Die Konstruktion von ITER, dem ersten Reaktor, welcher eine positive Energiebilanz erreichen soll, 2) seine wissenschaftlichen Nutzung und schliesslich 3) die Konstruktion und Nutzung von DEMO, dem ersten Prototyp eines kommerziellen Reaktors.

Dieser Artikel verschafft einen Überblick über die Prinzipien der Kernfusion und ihrer Vorteile, der dafür verwendeten Technologien, der Forschung in diesem Bereich und der Herausforderungen, welche die Implementierung dieser Energiequelle umfassen. Es werden insbesondere die Schweizer Beiträge zur Entwicklung dieses Projektes als Teil einer weltweiten Forschungsgemeinschaft präsentiert.

Fusionsreaktionen

Wie alle aktiven Sterne bezieht unsere Sonne ihre Energie aus Kernreaktionen, vor allem aus jenen, die Wasserstoff in Helium umwandeln. Diese Reaktionen, die

¹ Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne (EPFL), Swiss Plasma Center (SPC), CH-1015 Lausanne

² Dieser Beitrag wurde in französischer Sprache im Bulletin SEV/VSE 4/2014 publiziert und für die «Mitteilungen» durch die Autoren aktualisiert. Der französische Original-Beitrag findet sich auch auf der Bulletin-Homepage: <http://bulletin.ch/de/news-detail/alexia-la-fusion-nucleaire.html>

Wir bedanken uns beim Bulletin SEV/VSE für die Möglichkeit diesen Beitrag zu übernehmen und bei den Autoren für die Aktualisierungen und insbesondere für die deutsche Übersetzung.

leichte Atomkerne zu schwereren verschmelzen, bilden die Familie der Fusionsreaktionen. Sie stehen im Gegensatz zur Kernspaltung, bei welcher Energie freigesetzt wird durch die Aufspaltung schwererer Atomkerne, wie Uran, in leichtere Elemente. Die Umwandlung von Wasserstoff in Helium vollzieht sich dabei in mehreren Schritten (s. Abb. 1):

- Zwei Protonen verschmelzen und bilden so Deuterium, auch bekannt als «schwerer Wasserstoff», bezeichnet mit D oder ^2H (also Wasserstoff, dessen Kern wie gewöhnlich ein Proton, aber nun auch ein Neutron enthält). Es werden dabei ebenso ein Positron (e^+) und ein Neutrino (ν) freigesetzt.
- Der Deuterium Kern kann wiederum mit einem Proton verschmelzen um Helium-3 (^3He) zu bilden, wobei ein Photon als Gamma-Strahlung ausgesendet wird.
- Schliesslich produziert die Reaktion zweier Helium-3-Kerne Helium-4 (^4He) und zwei Protonen.

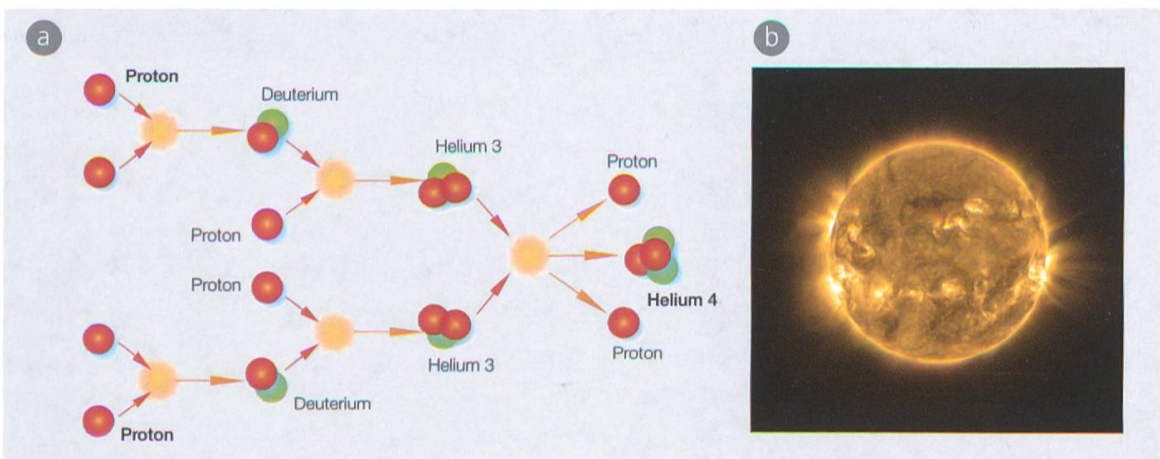


Abb. 1: Die wichtigste Fusionsreaktion in der Sonne, die Proton-Proton Reaktion (a) sowie eine Fotografie der Sonne (b).

Jede einzelne dieser Reaktionen setzt Energie frei, von welcher wir in Form von Sonnenstrahlen profitieren. Allgemein setzen Kernreaktionen eine erhebliche Menge an Energie frei, da die Bindungsenergie zwischen Protonen und Neutronen – geregelt durch die Starke Wechselwirkung – enorm ist. Sie ist viele Grössenordnungen stärker als die chemische Bindungsenergie, die in Verbrennungsprozessen freigesetzt wird. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit (der «Wirkungsquerschnitt»), dass die o.g. Reaktionen ablaufen teilweise sehr klein – weswegen die Sonne bis heute noch scheint.

Um diese Energiequelle auf der Erde zu nutzen, ist es daher notwendig, eine andere Reaktion zu verwenden. Diejenige mit der bei weitem grössten Fusionswahrscheinlichkeit, und deshalb die interessanteste, ist die Fusion von Deuterium und Tritium. Symbolisiert mit T oder ^3H wird Tritium auch «superschwerer» Wasserstoff genannt und enthält ein Proton und zwei Neutronen.

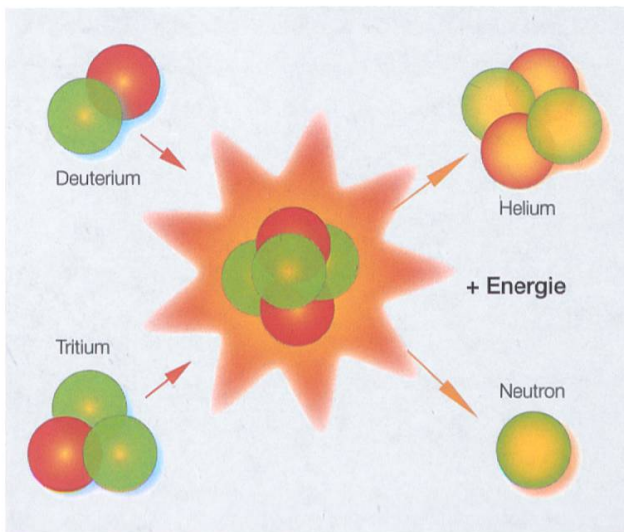


Abb. 2: Die Fusionsreaktion von Deuterium und Tritium bietet die grösste Reaktionswahrscheinlichkeit («Wirkungsquerschnitt») und wurde daher zum Ziel der Energiegewinnung ausgewählt. Sie produziert einen Helium-4-Kern (auch «Alpha-Teilchen» genannt) mit 3,5 MeV und ein Neutron mit 14 MeV.

Der Ablauf dieser Reaktion setzt dennoch voraus, dass die Teilchen über genügend kinetische Energie verfügen, um die Abstossung durch ihre elektromagnetische Wechselwirkung zu überwinden. Denn erst wenn die Teilchen sich genügen nahe kommen können, kann die starke Wechselwirkung überhand nehmen und die Fusion ermöglichen. Das einfachste Mittel, um die kinetische Energie der Teilchen wachsen zu lassen, ist ihre Temperatur zu erhöhen. Im Fall der D-T Fusion erreicht die Reaktionswahrscheinlichkeit ihr Maximum bei einer Temperatur von etwa 100 Millionen Grad Celsius!

Plasma

Bereits bei einer Temperatur von ca. 10 000 Grad ist die thermische Bewegung der Teilchen in einem Gas ausreichend, um die Elektronen aus ihren Orbitalen um die Atomkerne auszustossen. Das Resultat ist eine «Suppe» aus ionisierten Atomen und freien Elektronen – ein «Plasma», welches man oft als den vierten Aggregatzustand der Materie bezeichnet. Ein Plasma wird, im Gegensatz zu einem Gas, durch eine Vielzahl kollektiver Phänomene charakterisiert, die ihren Ursprung in diversen elektromagnetischen Wechselwirkungen haben. Sein Verhalten ist deshalb in vielerlei Hinsicht spannender als das eines Gases neutraler Teilchen.

Ein sehr grosser Anteil des sichtbaren Universums besteht aus Plasma, insbesondere alle Sterne. Auf der Erde jedoch sind Plasmas eher selten. Auf natürliche Weise treten sie z.B. in Blitzen oder Nordlichtern auf. Künstlich wird Plasma z.B. in Leuchtstoffröhren oder Plasma-Bildschirmen erzeugt.

Ein Fusionsreaktor

Das Grundprinzip eines Fusionsreaktors (s. Abb. 3) besteht darin, eine D-T-Mischung auf Temperaturen von ca. 100 Millionen Grad zu erhitzen und die kinetische Energie der Reaktionsprodukte (ein Neutron und ein Helium-4-Kern) rückzugewinnen, um diese letztendlich in Elektrizität umzuwandeln. Energetisch gesehen wird ein Fusionsreaktor rentabel, wenn seine Leistung höher wird als die

Leistung, die angelegt werden muss, um das Plasma einzuschliessen und es auf der nötigen Temperatur zu halten. Physikalisch gesehen wird die Rentabilität eines Reaktors durch das Lawson-Kriterium beschrieben: Das Produkt der Plasmadichte, der Plasmatemperatur und der «Energieeinschlusszeit» muss einen bestimmten Grenzwert überschreiten. Die Energieeinschlusszeit entspricht der charakteristischen Zeitspanne, über welche ein System seine Wärme verliert. Sie wird berechnet, indem man die Energie des Systems durch die Leistung dividiert, die benötigt wird, um eben jene Energie aufrechtzuerhalten.

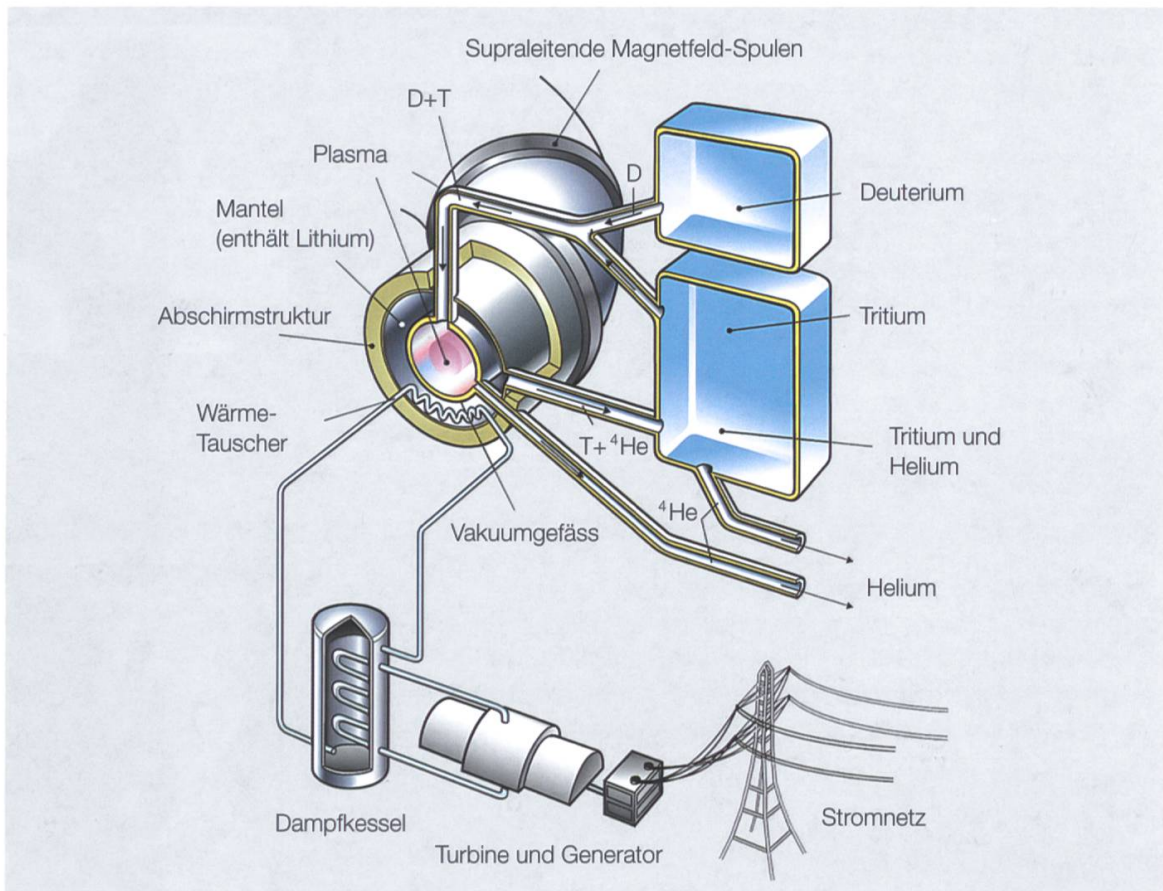


Abb. 3: Funktionsschema eines Fusionsreaktors.

Die Wahl des Reaktortyps

Das Lawson-Kriterium kann auf zwei sehr unterschiedliche Weisen erfüllt werden, die von zwei verschiedenen Reaktortypen ausgehen:

- In einem Reaktor für Trägheitsfusion wird die D-T-Mischung mithilfe von Hochleistungs-Lasern unter extrem hohen Druck gesetzt, wodurch sich die Plasmadichte stark erhöht – allerdings nur für eine sehr kurze Zeitspanne, also mit kurzer Energieeinschlusszeit.

- In einem Reaktor für Fusion mittels magnetischem Einschluss nutzt man das Prinzip, dass ein weit weniger dichtes Plasma in einem Magnetfeld eingeschlossen werden kann – dies jedoch für sehr viel längere Zeiträume.

In beiden Fällen wird der Grossteil der frei werdenden Energie von Neutronen mit einer Energie von 14 MeV getragen. Diese werden im «Blanket» abgebremst, der inneren Schutzhülle der Reaktorwand. Dieses Abbremsen produziert Wärme, die wiederum durch ein Kühlsystem abgeführt wird, um mithilfe von üblichen Kraftwerksturbinen und Generatoren Strom zu erzeugen. Die Module des Blanket werden gleichzeitig zum Brüten von Tritium dienen, welches in Kollisionen der Neutronen mit im Blanket eingeschlossenem Lithium-6 gebildet wird. Im Gegensatz zum Tritium, welches wegen seiner relativ kurzen Halbwertszeit nicht natürlich vorkommt und deshalb aus Lithium gebildet werden muss, existiert Deuterium in riesigen Mengen im Wasser. Die Forschung in Europa setzt vor allem auf das magnetische Einschlussprinzip, da es als vielversprechender für die Entwicklung eines Reaktors eingeschätzt wurde.

Diese Entscheidung, begleitet von substanziellen Investitionen, hat es Europa ermöglicht, eine weltweite Schlüsselposition in der Fusionsforschung zu bekleiden. So beheimatet Europa die zurzeit leistungsfähigste Fusionsforschungsanlage sowie den bereits erwähnten und sich im Bau befindenden ITER.

Vorteile der Fusion

Das Hauptinteresse an der Kernfusion beruht darauf, dass sie erhebliche Mengen an Energie aus häufig vorkommenden «Brennstoffen» freisetzen kann, und dies bei minimalen Auswirkungen auf die Umwelt. Deuterium ist mit einem Verhältnis von 1 zu 6500 Wasserstoffatomen natürlich in Wasser vorhanden. So haben wir z.B. genügend Deuterium im Genfer See, um den Gesamtenergiebedarf der Schweiz für zehntausende von Jahren zu decken – und dabei ist der kontinuierliche Zufluss von neuem Wasser in den See noch nicht einmal berücksichtigt. Lithium ist etwas weniger häufig, doch sind seine Vorkommen (besonders in seiner im Wasser gelösten Form) zur Deckung des gesamten weltweiten Energiebedarfes für einige zehntausend Jahre mehr als ausreichend.

Zudem sind die Elemente und Isotope, die in den Fusionsreaktionen produziert werden, nicht radioaktiv. Lediglich die Komponenten des Reaktors selbst werden durch Neutronen aktiviert. Jedoch verliert der Grossteil der vorgesehenen Materialien ihre Radioaktivität in weniger als 100 Jahren. Der verbleibende Teil kann intern wiederverwertet werden, z.B. für den Bau eines neuen Reaktors.

Im Gegensatz zur Kernspaltung sind Fusionsreaktionen keine Kettenreaktionen, sodass es keine Möglichkeit einer Kernschmelze gibt. Ferner wird der Brennstoff nur in kleinen, kontrollierten Mengen in die Mitte des Plasmas injiziert um eine optimale Operation des Reaktors zu erlauben. Es reicht also im Problemfall

aus, die Brennstoffzufuhr zu unterbrechen um alle Reaktionen zum Erliegen zu bringen.

Schlussendlich produziert die Fusion auch kein CO_2 und ist unabhängig von allen meteorologischen Bedingungen. Sie ist daher geeignet, Energie lokal und «am Laufband» zu erzeugen, so wie es unsere Zivilisation heute in vielen Bereichen benötigt.

Magnetischer Einschluss

Das Konzept des magnetischen Einschlusses basiert darauf, dass geladene Teilchen magnetischen Feldlinien folgen. In einem homogenen und geradlinigen Magnetfeld z.B. haben die Bahnen der Teilchen die Form einer Helix um eine Feldlinie herum. Eine solch simple Konfiguration ist jedoch unzureichend für einen Reaktor, da die Verluste von Teilchen entlang der Feldlinien zu gross wären.

Die Idee, die Feldlinien daher in der Form eines Torus zu schliessen, ist schon sehr früh entstanden. Dabei bleibt dieses «toroidale» Magnetfeld jedoch nicht gleichmässig, sondern es entsteht ein radialer Gradient, der die Teilchen vertikal driften lässt. Das Hinzufügen eines «poloidalen» Magnetfeldes (s. *Abb. 4*) führt zu einer «Verdrillung» der Feldlinien, welche nun abwechselnd durch den unteren und oberen Teil des Plasmas führen und so den Effekt der Driften ausmitteln.

Dieses poloidale Magnetfeld kann entweder durch einen toroidalen Stromfluss im Plasma erzeugt werden, oder durch komplex geformte Spulen. Ersteres Konzept trägt den Namen «Tokamak»- ein Akronym aus dem Russischen – und ist die am weitesten entwickelte Methode des Plasmaeinschlusses. Letzteres Konzept wird «Stellarator» genannt und wird weiter unten im Zusammenhang mit Wendelstein 7-X kurz beschrieben.

Der Tokamak

Tokamaks (s. *Abb. 4*) sind wissenschaftliche Anlagen zur Förderung unseres Verständnisses von heissen Plasmas und deren effizientem Einschluss. Die ersten Reaktoren, insbesondere ITER, werden ebenso auf diesem Konzept basieren. Ein Tokamak besteht prinzipiell aus 4 Grundkomponenten:

- Eine torusförmige Vakuum-Kammer, in welcher das Plasma erzeugt und erhalten wird. Die heutigen Tokamaks besitzen Vakuum-Kammern, deren Torus Radius (auch «grösserer Radius» genannt) zwischen 0,5 und 3 Metern misst.
- Eine Toroidal-Feldspule, bestehend aus mehreren Einzelspulen, welche die Vakuum-Kammer in regelmässigen Abständen umschliessen und in Serie geschaltet sind. Dieser Spulensatz erzeugt das primäre (toroidale) Magnet-

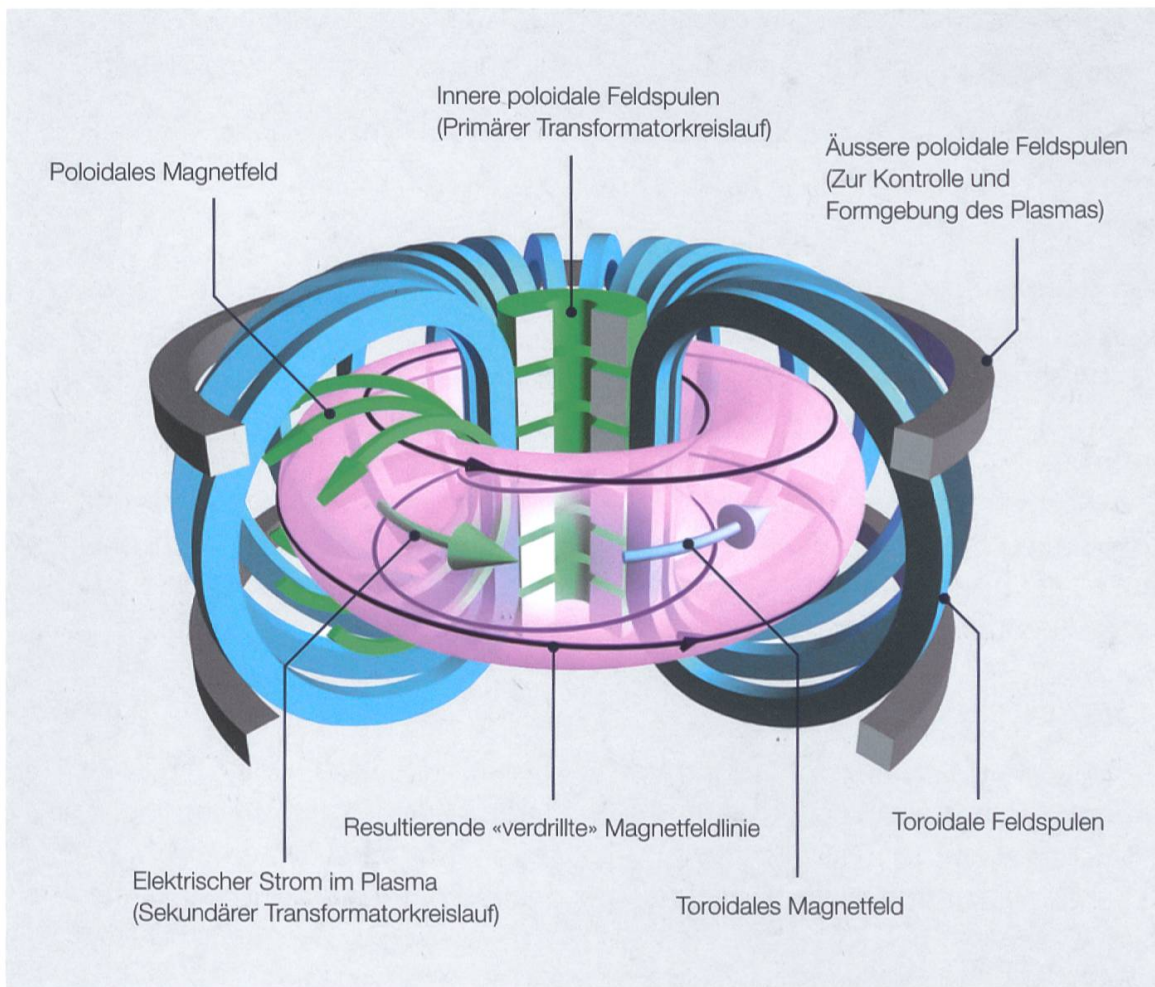


Abb. 4: Schema des Tokamak-Konzeptes.

feld, dessen Stärke in der Mitte der Vakuum-Kammer 1 bis 8 Tesla beträgt. Mehrere Tokamaks sind noch mit Spulen aus Kupfer ausgestattet, wobei die neuesten nun mit supraleitenden Magneten funktionieren.

- Ein Transformator, bestehend aus ein oder mehreren Feldspulen, in denen Strom in toroidaler Richtung fließt, welcher nach dem Prinzip der Induktion den Stromfluss im Plasma hervorruft. In aktuellen Tokamaks werden so Ströme von einigen Hunderttausend bis Millionen Ampere induziert.
- Ein dritter und letzter Satz von Poloidal-Feldspulen produziert ein poloidales Magnetfeld, welches die Modifikation der Form des Plasma-Querschnitts erlaubt. Es ist insbesondere möglich, Konfigurationen zu erzeugen, in denen das poloidale Magnetfeld in einem Punkt zu Null gesetzt wird – einem sogenannten «X-Punkt». Die Oberfläche des Plasmas wird in diesem Fall sozusagen durch diesen Punkt hindurch gezwungen, was es ermöglicht, das Plasma weiter entfernt von den Wänden der Vakuum-Kammer zu halten und dabei genau zu kontrollieren, auf welche Wandkomponenten das Plasma und seine Energie letztlich treffen.

Obgleich Tokamaks stark in ihrer Grösse und ihrem Design variieren, bestehen sie alle aus diesen 4 Grundkomponenten, zu denen noch Heizungssysteme und eine Vielzahl von Messinstrumenten hinzukommen.

Aufheizen des Plasmas

Der Stromfluss im Tokamak-Plasma dient nicht nur dem Plasma-Einschluss, sondern führt gleichzeitig zu einer Erhitzung des Plasmas. Jedoch verringert sich der elektrische Widerstand des Plasmas mit ansteigender Temperatur, wodurch diese ohmsche Heizung unzureichend ist, um die letztlich benötigten Temperaturen zu erreichen.

Daher wurden zwei andere Methoden zur Aufheizung entwickelt, die auf sehr unterschiedliche physikalische Prozesse zurückgreifen (s. Abb. 5): Die Aufheizung durch elektromagnetische Wellen (im Spektrum der Radio- oder Mikrowellen) sowie Neutralteilcheninjektion.

Mikrowellenheizung

Die Heizung durch elektromagnetische Wellen nutzt die Möglichkeit, die Leistung in einer solchen Welle durch eine Resonanz auf Teilchen zu übertragen, wie es in Mikrowellen für den Hausgebrauch geschieht. Mehrere Phänomene innerhalb des Plasmas besitzen klar definierte Resonanz-Frequenzen und erweisen sich

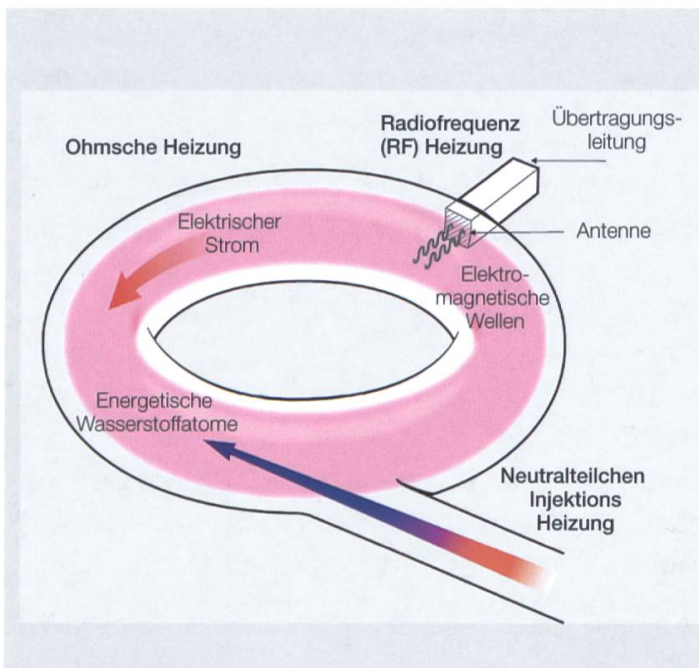


Abb. 5: Die verschiedenen Arten von Heizungssystemen für das Plasma: Ohmsche Heizung, Heizung mithilfe von elektromagnetischen Wellen (Mikrowellenheizung) und Neutralteilcheninjektion.

daher als nützlich. Zum Beispiel vollzieht sich die Rotation der geladenen Teilchen um die magnetischen Feldlinien mit einer Frequenz, die ausschliesslich von der lokalen Stärke des Magnetfelds abhängt, welche wiederum primär entlang des grösseren Radius des Torus abnimmt. Daher tritt eine geeignete Welle, die von aussen eingestrahlt wird, an einem bestimmten Radius z.B. in Resonanz mit der Rotationsbewegung der Elektronen. Die Leistung dieser Welle wird also genau dort – und nur dort – auf die Elektronen übertragen. Diese Art der Aufheizung wird «Elektronen-Zyklotron-

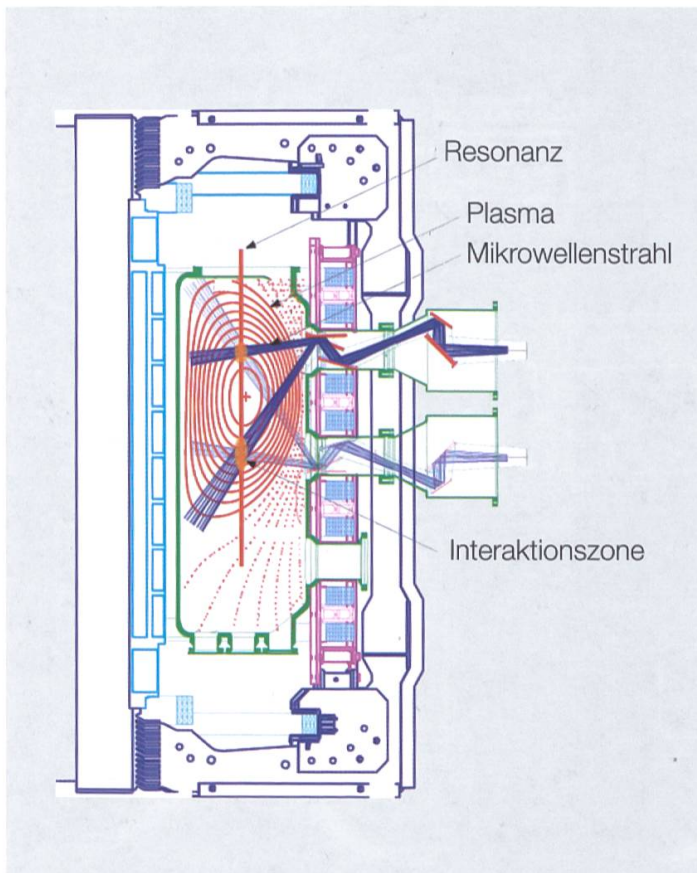


Abb. 6: Das Mikrowellenheizungssystem und Spiegelanordnung des TCV Tokamaks (französisch «Tokamak à Configuration Variable») des Swiss Plasma Center (SPC) an der EPFL.

Resonanzheizung» genannt. Im Allgemeinen liegt die Frequenz der hierbei injizierten Wellen im Bereich der Mikrowellen, in der Größenordnung von 100 GHz, und wird so gewählt, dass sie einer Resonanzfrequenz in der Mitte des Plasmas entspricht. Wenn der Strahl dieser Wellen schmal genug ist, besteht ebenso die Möglichkeit andere Teile des Plasmas, bis hin zu seiner Oberfläche, aufzuheizen, indem man den Strahl vertikal justiert (s. Abb. 6).

Zum Erzeugen dieser Mikrowellen werden Gyrotrons benutzt: Sie liefern gewöhnlich zwischen 500 und 1000 kW Leistung pro Gerät. Grosse Tokamaks werden mit bis zu 20 MW Mikrowellenleistung betrieben.

Neutralteilcheninjektion

Dieser Prozess besteht darin, einen Strahl ungeladener Teilchen mit hoher Energie in das Plasma zu injizieren. Diese Energie wird dort durch Kollisionen auf die Plasma-Teilchen übertragen. Die Absorption des Strahls beginnt daher schon, sobald dieser in das Plasma eintritt, erhöht sich jedoch mit zunehmender Plasmadichte, wodurch ein grosser Teil der Leistung erst nahe der Mitte des Plasmas übertragen wird. Generell wird der Strahl neutraler Teilchen tangential injiziert, um einen längeren Bereich der Absorption zu erhalten. Die injizierten Teilchen müssen eingangs ungeladen sein, um ungehindert vom Magnetfeld des Tokamak ins Plasma eindringen zu können.

Ein Neutralteilcheninjektor enthält einen Ionen-Beschleuniger, bestehend aus einer Plasmaquelle zwischen einer Anode und einer Kathode. Diese Ionen, meist Deuterium, werden dort in Richtung des Plasmas beschleunigt und durchqueren dann eine Kammer, in welcher sie neutralisiert werden, bevor sie weiterhin zum Plasma gelangen. Wie bei der Mikrowellenheizung sind einige Tokamaks mit Neutralteilcheninjektoren von mehreren MW Leistung ausgestattet.

Messinstrumente

Da es nicht möglich ist, ein gängiges Messinstrument wie einen Thermometer in einem Fusionsplasma zu platzieren, musste eine weite Palette von Messinstrumenten entwickelt werden, um Plasmas und die diversen Phänomene in ihrem Inneren zu charakterisieren. Im Folgenden werden die Grundprinzipien einiger dieser Messmethoden erläutert.

Räumliche Verteilung des Plasmastroms

Eine Reihe von magnetischen Sonden in der inneren Wand des Tokamak misst die lokale Stärke des poloidalen Magnetfelds. Ausgehend davon ist es möglich, den Gesamtwert des elektrischen Stroms im Plasma zu berechnen. Da normalerweise eine Vielzahl solcher Sonden zur Verfügung steht, kann ebenso auf die räumliche Verteilung dieses Stroms und daher auf die Position und sogar die Form des Plasmas geschlossen werden.

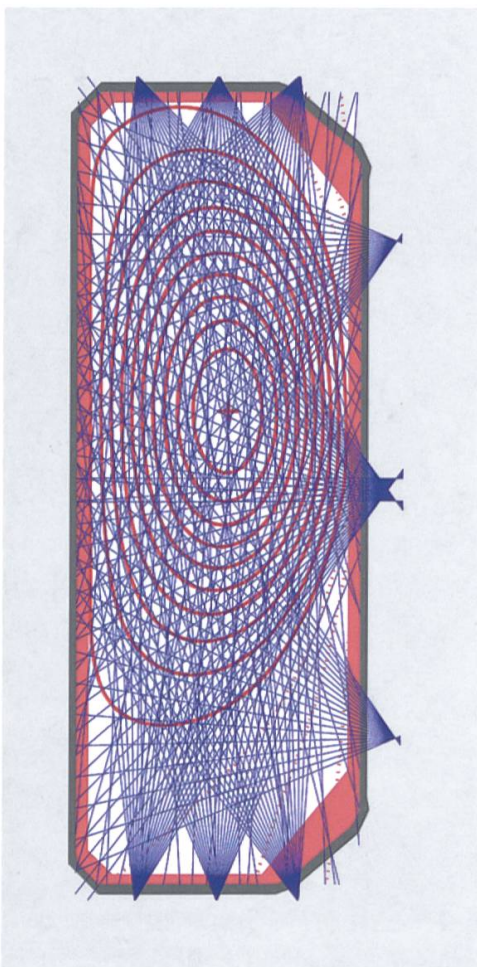


Abb. 7: Verteilung der zehn tomografischen Kameras, jeweils mit 20 Kanälen, die um die Vakuumpumpe des TCV platziert sind.

Strahlungsspektrum

Das Plasma emittiert ein weites Spektrum an Strahlung, dessen Messung verschiedenste Informationen liefert: Das Messen von weicher Röntgenstrahlung (d.h. Röntgenstrahlung mit geringer Energie) erlaubt die Erfassung komplexer magnetischer Strukturen mithilfe von tomographischer Analyse – ähnlich der Modelle im medizinischen Bereich. Sichtbares Licht dient u.a. dazu, Teile des Plasmas zu erkennen, in denen Verunreinigungen vorkommen.

Plasmadichte

Die Dichte des Plasmas kann durch Interferometrie gemessen werden: Die Hälfte eines Laserstrahls durchdringt das Plasma, während die andere Hälfte ausserhalb der Maschine verläuft. Während das Laserlicht das Plasma durchdringt, wird es durch seine Dichte abgebremst, was zu einem abwechselnden Muster aus Licht und Schatten führt, wenn beide Hälften wieder zusammengeführt werden – es entsteht ein Interferenzmuster. Durch das Zählen der Wechsel in diesem Muster wird so die Plasmadichte bestimmt.

Plasmatemperatur

Die Temperatur des Plasmas wird mit Hilfe von Lasern bestimmt: Wenn ein Sensor das Laserlicht misst, welches von den Elektronen gestreut wird (s. Abb. 8), erhält er eine grössere oder kleinere Wellenlänge als im ursprünglichen Laser, abhängig davon, ob die Elektronen sich jeweils auf den Sensor zu, oder von ihm weg bewegen (Doppler-Effekt). Da sich die Elektronen in einem Plasma in alle Richtungen bewegen und typischerweise eine sogenannte Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung besitzen, misst ein solcher Sensor ein Spektrum gleich einer Gauss'schen Glockenkurve, zentriert auf der ursprünglichen Wellenlänge des Lasers. Je höher die Temperatur des Plasmas ist, desto höher sind die Geschwindigkeiten der Elektronen und desto breiter ist dieses Spektrum. Das Messen der Breite dieses Spektrums gibt also direkten Rückschluss auf die lokale Plasmatemperatur entlang des Lasers.

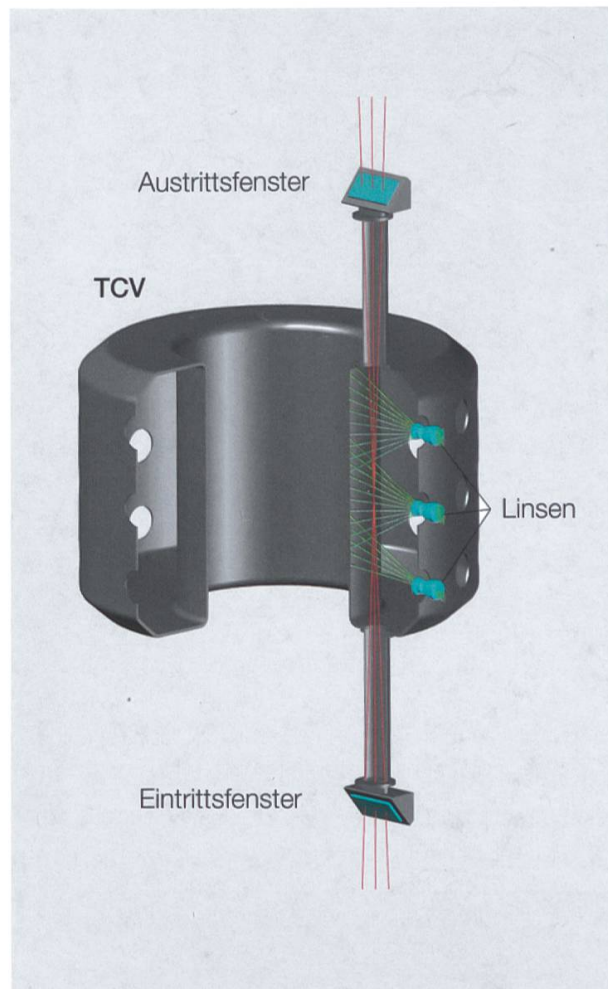


Abb. 8: Schema der Anlage zur Messung von Thomson-Streuung, welche zur Bestimmung der Plasmatemperatur dient.

Der TCV Tokamak

Der Tokamak am Swiss Plasma Center (SPC) an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), besitzt als Besonderheit einen Satz von 16 Poloidal-Feldspulen, um das Plasma auf sehr vielfältige Weise zu formen. Daher erhielt er auch seine Bezeichnung «Tokamak à Configuration Variable», kurz TCV (s. Abb. 9). Der grössere Radius des Torus beträgt 90 cm. Auf der zentralen (toroidalen) Achse des Plasmas wird typischerweise ein Magnetfeld von 1,5 Tesla erzeugt, während der Stromfluss im Plasma bis zu 1 MA erreichen kann. Der poloidale Querschnitt der Vakuum-Kammer ist dreimal so hoch wie breit und die 16 Poloidal-Feldspulen sind auf beide Seiten der Kammer verteilt. Diese Auslegung ermöglicht es, die Eigenschaften des Plasmas abhängig von seiner Form zu untersuchen. So konnte z.B. nachgewiesen werden, dass eine gewisse Elongation des Plasmas (d.h. das Verhältnis seiner Höhe zu seiner Breite) und Dreieckigkeit (d.h. die radiale Position des höchsten Punktes des Plasmas im Verhältnis zu seiner Mitte) beide vorteilhaft

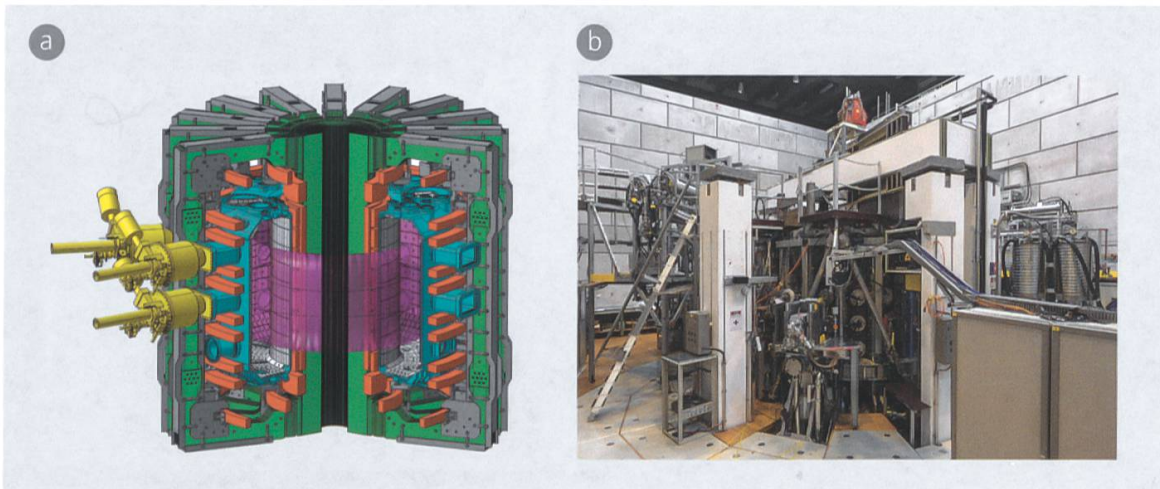


Abb. 9: Der TCV Tokamak: Technisches Schema (a) mit Plasma (violett), Vakuum-Kammer (cyan), Toroidal-Feldspule (grün), Transformator- und Poloidal-Feldspulen (orange) und Komponenten der Mikrowellenheizung (gelb), sowie eine Fotografie in ähnlicher Perspektive (b).

sind, um die Energieeinschlusszeit zu erhöhen. Des Weiteren können neue Plasma-Konfigurationen erprobt werden. Vor kurzem erst haben so die Physiker an der EPFL zum weltweit ersten Mal ein Plasma erzeugt, dessen Form teilweise einer Schneeflocke gleicht. Diese Konfiguration erhielt so den englischen Namen

«snowflake», entsprechend der hexagonalen Struktur seines X-Punktes, also jenem Punkt, in welchem das poloidale Magnetfeld zu Null gesetzt wird (s. Abb. 10). TCV ist zudem mit einem komplexen Elektronen-Zyklotron-Heizungssystem ausgerüstet. Neun Gyrotrons liefern jeweils 500 kW an Leistung, die mithilfe einer Spiegelanordnung nicht nur an verschiedenen Radien, sondern auch mit variierendem Injektionswinkel in toroidaler Richtung ins Plasma eingespeist werden kann. Eine teilweise toroidale Injektion hat zum Vorteil, dass das Plasma so nicht nur aufgeheizt wird, sondern in ihm ebenso ein Stromfluss erzeugt wird. Die lokale Stromerzeugung im Plasma kann für eine starke Reduzierung des Verlustes von Plasma nach aussen eingesetzt werden, wodurch im TCV Temperaturen von mehr als 100 Millionen Grad erreicht werden können.

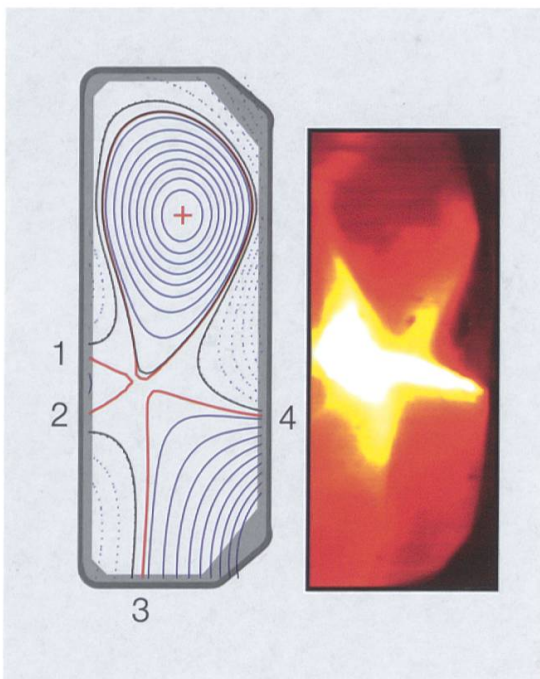


Abb. 10: Magnetische Rekonstruktion des Plasmaquerschnittes (a) und Fotografie (b) eines Plasmas in der Konfiguration «snowflake» («Schneeflocke»), benannt nach der hexagonalen Struktur seines X-Punktes.

Der JET Tokamak

In Europa wurde schon vor vielen Jahren ein gemeinsames Forschungsprogramm ins Leben gerufen, um die wissenschaftlichen Anstrengungen zur Fusion zu koordinieren. Neben den sehr verschieden konzipierten, national betriebenen Tokamaks hat Europa dafür einen grösseren Tokamak namens «JET» (für «Joint European Torus») in der Nähe von Oxford konstruiert. Mit einem grösseren Radius von 3 m, hat sich diese Maschine am meisten an eine positive Energiebilanz angenähert, d.h. einem Szenario, in welchem das Verhältnis von Fusionsleistung zu injizierter Leistung (die Leistungsverstärkung) eins beträgt. So wurde eine Fusionsleistung von bis zu 16 MW erreicht, was 64% der ins Plasma injizierten Leistung (25 MW) entsprach. JET hat es ebenso ermöglicht, alle bisher in Betracht gezogenen Betriebsmodi für Tokamaks zu testen. Bis heute aktiv, erfüllt JET seine Aufgabe als Testbank für das nächste Etappenziel: ITER. Des Weiteren wurden die Module seiner inneren Wand kürzlich von den bis heute gängigen Kohlenstoffkacheln auf Wolframkacheln umgerüstet.

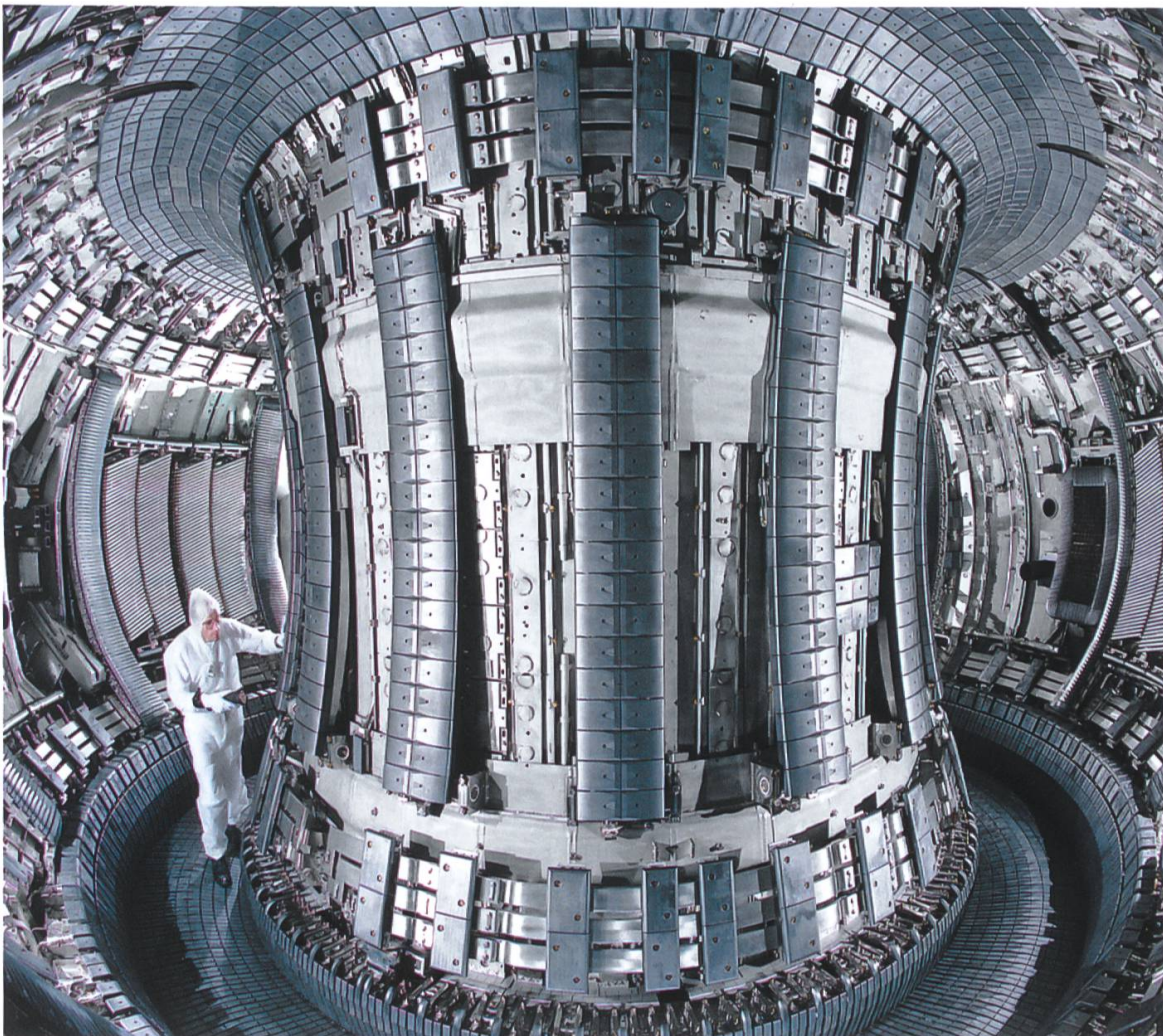


Abb. 11: Innenansicht der Vakuumschleife des JET Tokamak.

Der Wendelstein 7-X Stellarator

Wie oben bereits kurz erwähnt, kann die für den Plasmaeinschluss nötige Verdrillung der Magnetfeldlinien nicht nur durch einen Plasmastrom erzeugt werden (wie es im Tokamak geschieht), sondern auch durch passend geformte Magnetfeldspulen. Und genau dieses Prinzip wird im Stellarator-Konzept verwendet. Dies hat den Vorteil, dass kein Strom im Plasma induziert werden muss, was das Erreichen eines Dauerbetriebs erleichtert und gewisse Instabilitäten unterdrückt. Dem gegenüber stehen Schwierigkeiten mit dem Einschluss der durch die Fusion entstehenden, sehr energiereichen Helium-4 Ionen sowie eine aufwändigere Konstruktion mit grossen Präzisionsanforderungen. Letzteres ist mit ein Grund, weshalb Stellaratoren bisher noch nicht die gleichen Erfolge gefeiert haben wie Tokamaks.

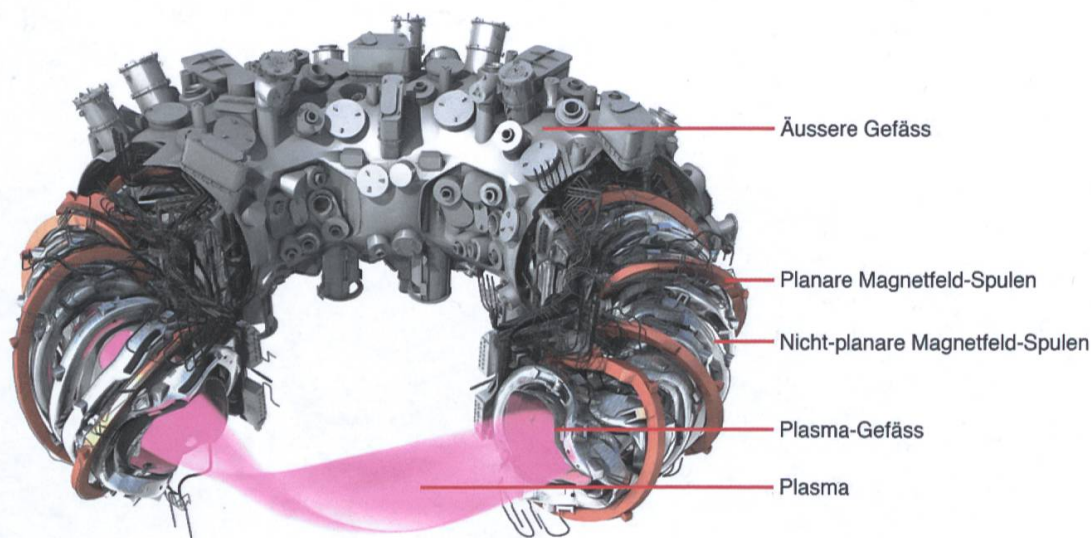


Abb. 12: Schematische Ansicht des supraleitenden Stellarator Wendelstein 7-X.

Dies könnte sich jedoch in den nächsten Jahren ändern, mit dem vor kurzem in Betrieb genommenen Wendelstein 7-X Stellarator in Greifswald in Norddeutschland (Abb. 12). Dieser «optimierte» Stellarator ist mit komplex geformten, supraleitenden Spulen ausgestattet und hat einen Torus-Radius von 5.5 Metern. Wendelstein 7-X wurde, nach 15 Jahren Bau, Ende 2015 fertiggestellt und hat zum Ziel, die Kraftwerkstauglichkeit des Stellarator-Konzepts zu zeigen. Wendelstein 7-X wird in den nächsten Jahren schrittweise auf die maximale Leistung gebracht und die ersten Resultate sind vielversprechend.

Theoretische Forschung

Während die Forschungsanstrengungen zur Entwicklung eines Reaktorkonzepts zur verlässlichen, kontinuierlichen und rentablen Energiegewinnung zu einem

grossen Teil experimenteller Natur sind, werden diese Anstrengungen durch vielseitige theoretische Studien ergänzt, geleitet und oft auch inspiriert. Es wird hierbei zuvorderst versucht, die verschiedenen Phänomene in Fusionsplasmas mithilfe von Modellen zu repräsentieren. Einerseits müssen diese elegant genug für eine kompakte mathematische Formulierung sein, um die entsprechenden Gleichungen durch Computersimulationen lösen zu können. Andererseits müssen sie komplex genug sein, um die physikalischen Abläufe auch in allen relevanten Aspekten zu widerspiegeln. Dies ist eine hochkomplizierte Aufgabe, da in Fusionsreaktoren eine Vielzahl von Prozessen vorliegen, welche sich zeitlich und räumlich über viele Grössenordnungen erstrecken. Darüber hinaus müssen die verschiedenen Regionen des Plasmas behandelt werden – von seiner Mitte, wo die meisten Fusionsreaktionen stattfinden, bis hin zu seinem Rand, wo die Interaktion des Plasmas mit der Wand der Vakuum-Kammer eine beachtliche Herausforderung darstellt. All dies erfordert die Entwicklung einer Vielfalt von mathematischen Ansätzen und Simulationscodes die schliesslich auf einigen der leistungstärksten Supercomputer der Welt mit Millionen Milliarden Operationen pro Sekunde verarbeitet und ausgeführt werden.

Das gewonnene theoretische Verständnis dient nicht nur dazu, das Verhalten vom Plasma in künftigen Experimenten verlässlicher vorherzusagen, sondern trägt auch dazu bei, Plasmas in einem Reaktor besser zu kontrollieren und seine Funktionsweise so zu optimieren.

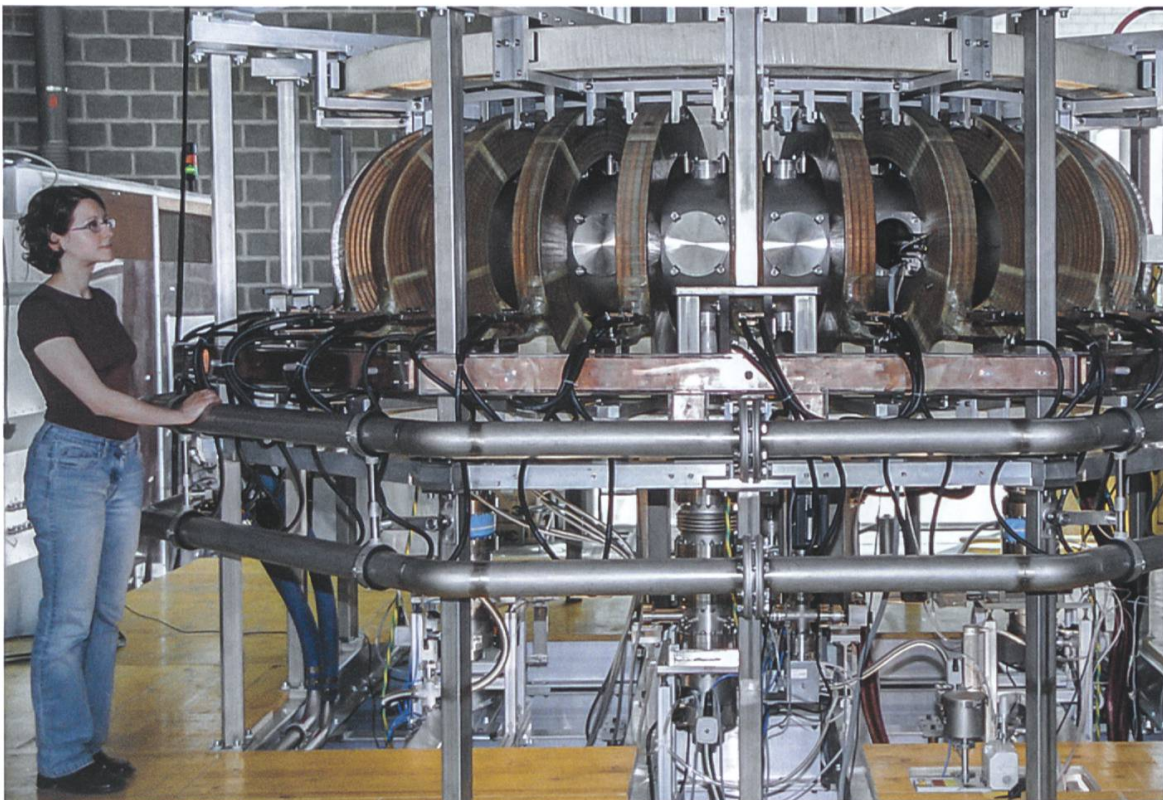


Abb. 13: Die TORPEX Maschine, eine Anlage für Experimente zu Grundlagen der Plasmaphysik, insbesondere Phänomene der Plasma-Turbulenz.

Grundlagenexperimente

Zusammen mit theoretischen Untersuchungen werden Experimente durchgeführt, die im Vergleich zu denen in Tokamaks von mehr fundamentaler Natur sind. Ein Beispiel ist das Experiment TORPEX («TORoidal Plasma EXperiment») am SPC. Die Konfiguration, Untersuchung und Kontrolle des Plasmas werden hier gezielt vereinfacht. Solche Maschinen stellen wichtige Teststände für theoretische Modelle dar, um deren Zuverlässigkeit zu testen und ihre physikalischen Grundlagen zu untermauern. Ein typisches Feld, in dem dieses Zusammenwirken von Theorie und Experiment substantielle Resultate geliefert hat, ist Plasma-Turbulenz – ein komplexes Phänomen, das den Verlust von Energie und Teilchen nach aussen bestimmen kann, und daher auch die Leistung eines Reaktors.

ITER

Die grossen Fortschritte der internationalen Forschung in Plasmaphysik und Ingenieurwesen zur Fusion erhalten in diesen Jahren eine konkrete Form in der Konstruktion von ITER in Cadarache, Frankreich (s. *Abb. 14*). Dieses Projekt wird durch eine weltweite Gemeinschaft getragen, bestehend aus Europa, Japan, den USA, Russland, Indien, Südkorea und China.

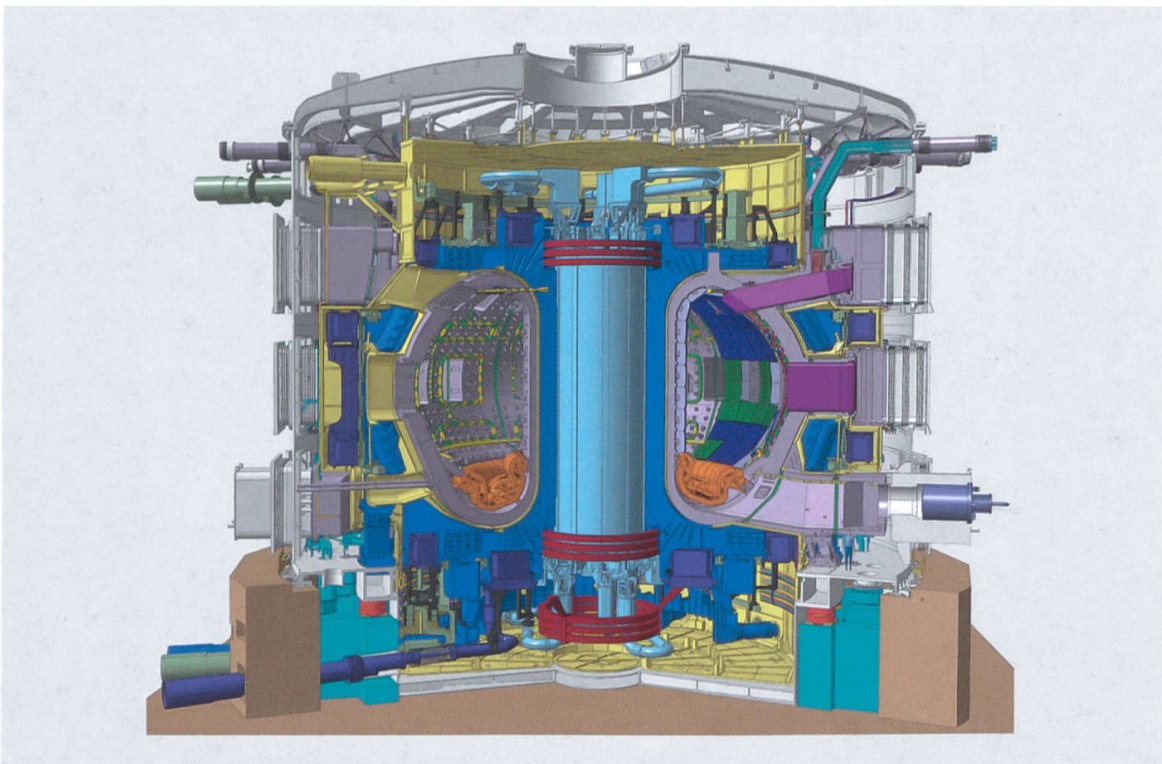


Abb. 14: Schema von ITER. Der gesamte Tokamak wird in einem Kryostat platziert, da alle Spulensätze Supraleiter sein werden. Man kann die Grösse dieser Anlage durch die skizzierte Person unten rechts erahnen.

ITER hat zum Ziel, sowohl die wissenschaftliche und technologische Realisierbarkeit der Fusion zu demonstrieren, als auch seine Sicherheit. Der enorme Masstab des Experiments ist dadurch bedingt, dass die Energieeinschlusszeit eines Plasmas mit seiner Grösse zunimmt. ITER wird so für eine Zeitspanne von einigen Minuten eine Fusionsleistung von 500 MW liefern, bei einer injizierten Leistung von 50 MW, also mit einer Leistungsverstärkung (bezeichnet mit Q) von 10.

Es wird sich um das erste «brennende» Plasma handeln, d.h. es wird hauptsächlich durch die geladenen Produkte seiner eigenen Fusionsreaktionen, den Alpha-Teilchen (Helium-4 Kerne mit 3,5 MeV), geheizt. Ein solches Plasma ist experimentelles Neuland und es werden hier neue Phänomene erwartet, wie z.B. die Interaktionen der Alpha-Teilchen mit bestimmten Wellen im Magnetfeld, die sie durch ihr Abbremsen selbst hervorrufen können. Das Erreichen und Erhalten eines solchen Plasmas ist die neue Vorfront der Physik im Bereich der Fusion.

Die Konstruktion und wissenschaftliche Nutzung von ITER bilden die ersten beiden Etappenziele im europäischen «Fahrplan» zur Fusion («European Fusion Roadmap»). Die europäischen Forschungszentren (wie auch das SPC) haben in diesem Rahmen den Auftrag, sich an der Konstruktion von ITER und an der Vorbereitung der geplanten Experimente zu beteiligen, z.B. durch das Verfeinern der vorgesehenen Betriebsmodi, um das Projekt so schliesslich effizient nutzen zu können. Das dritte und letzte Etappenziel dieses «Fahrplans» besteht in der Konstruktion und wissenschaftlichen Nutzung des ersten Prototyps für einen kommerziellen Reaktor, genannt «DEMO» (kurz für «DEMONstration Powerplant»). Dieser soll bereits einige hundert MW kontinuierlich ins Stromnetz einspeisen und so die ökonomische Rentabilität eines Fusionskraftwerks demonstrieren – der endgültige Schritt zur Kommerzialisierung von Fusionsenergie, der in den 2040er Jahren erfolgen soll.

Die Herausforderungen

Es bleiben nichtsdestotrotz einige Hürden zu nehmen, bevor Stromerzeugung durch Kernfusion kommerziell nutzbar wird.

Wissenschaftliche Herausforderungen

Mehrere entscheidende Fragen zu «brennenden» Plasmas bleiben noch offen, z.B. wie weit man eine Radio- oder Mikrowellenheizung nutzen kann, um die Plasmaparameter für das $Q=10$ Szenario zu erreichen, oder wie man die Auswirkungen von Plasma-Turbulenz in einem wenig erforschten D-T Mischungsverhältnis von 50:50 kontrollieren und eindämmen kann. Dieses Mischungsverhältnis birgt daher noch einige Geheimnisse, wie die exakte Form der Plasmaparameter

nahe seines Randes und wie genau man mit deren Hilfe die Betriebsmodi mit höchster Energieeinschlusszeit erreicht. Neue Experimente mit einer solchen D-T Mischung sind daher für JET vorgesehen.

Wenn die Bedingungen für das $Q=10$ Szenario geschaffen sind, muss man diese auch stabil erhalten. Es ist besonders wichtig, die produzierten Alpha-Teilchen hinreichend gut einzuschliessen, damit sie ihrer Aufgabe, den Rest des Plasmas aufzuheizen, auch gerecht werden können. Es handelt sich bei diesen um «Schnelle Ionen», da sie eine weitaus höhere kinetische Energie als die anderen Ionen des Plasmas besitzen. Ihre gesonderten Interaktionen mit magnetischen Wellen und Instabilitäten müssen daher genau kontrolliert werden, um den plötzlichen, kritischen Verlust von Teilchen und Energie zu vermeiden. Man muss bildlich gesprochen das «Feuer» unter Kontrolle halten. Selbst wenn es dem inhärenten Grundprinzip der Fusionsreaktionen nach unmöglich ist, eine unkontrollierte Kettenreaktion zu erhalten, ist eine Optimierung dieses «Feuers» wichtig um eine effiziente Energiegewinnung zu ermöglichen.

Darüber hinaus müssen diese Parameter für das brennende Plasma mit den technischen Gegebenheiten und Grenzwerten vereinbar sein, denen ein kontinuierlich betriebener Reaktor unterliegt.

Technische Herausforderungen

Im Bereich des magnetischen Einschliesssystems liegt die Herausforderung darin, die grössten je entwickelten supraleitenden Magnetspulen zu konstruieren und langfristig auf verlässliche Weise zu betreiben. Die diversen Spulensätze für ITER werden ungefähr 1000 Tonnen wiegen und die einzelnen supraleitenden Windungen eine Gesamtlänge von 200 km erreichen. Diese supraleitenden Kabel zu testen und die Eigenschaften der einzelnen Stränge und Windungen im grossen Massstab zu überprüfen, ist bei ITER ein grundlegender Teil des R&D («Research and Development»). Diese Aufgabe wird durch das SPC mithilfe seiner einzigartigen Einrichtung «Sultan» in seiner Abteilung am Paul Scherrer Institut (Villigen) wahrgenommen.

Es ist auch notwendig sicherzustellen, dass die inneren Wände der Vakuumkammer nicht zu viel Tritium absorbieren und trotz des enormen Energieflusses aus dem Plasma nur kontrollierbare Mengen an Verunreinigungen in Form von Staub oder «Sekundäremissionen» produzieren. Für die ökonomische Rentabilität eines Reaktors muss man einerseits zeigen, dass es möglich ist, genug Tritium mithilfe von Neutronen aus Fusionsreaktionen zu produzieren, die auf Lithium-6 innerhalb des Blanket treffen, und andererseits, dass ein erheblicher Anteil des ins Plasma injizierten Tritiums auch verbrannt wird. Die Wände der Kammer müssen darüber hinaus eine ausreichend hohe Temperatur aushalten können, um eine gute thermodynamische Effizienz des Reaktors zu garantieren.

Kontrolle des Plasmas

Die häufig als am problematischsten eingeschätzte Herausforderung besteht jedoch darin, die Interaktionen des Plasmas selbst mit den Wänden der Vakuum-Kammer auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren. Es muss noch eine Verfahrensweise spezifiziert und ausführlich getestet werden, die es entweder erlaubt, den plötzlichen, globalen Verlust des Plasmas (genannt «Disruption») komplett auszuschliessen, oder im Extremfall deren Konsequenzen einzudämmen.

Die Handhabung der unvermeidlichen Verluste von Teilchen am Rand des Plasmas muss ebenso optimiert werden. Dazu müssen zuvorderst die energiereichsten Instabilitäten kontrolliert werden, die sich dort während der Betriebsmodi mit hoher Energieeinschlusszeit aufbauen. Auch muss gewährleistet werden, dass die austretende Energie mehr in Form von gleichmässiger Abstrahlung als von direktem Teilchenfluss abgeführt wird. Dabei gilt es, Druck- und Temperatur-Gradienten zu meistern, die zu den höchsten im uns bekannten Universum gehören: Ein Abfall von mehreren Dutzend Millionen Grad auf Raumtemperatur in nur wenigen Zentimetern.

Analog der Situation, wenn sich zu viel Schnee auf einer stark geneigten Fläche ablagert, führen diese Gradienten zu energiereichen, lawinenartigen Instabilitäten. Dies stellt eine echte Schwierigkeit für die Innenwände der Vakuum-Kammer dar und nur die hitzeresistentesten Materialien kommen daher bei einem solchen Energiefluss von ca. 10 MW/m² in Frage. Jene müssen ebenso den diversen technischen Anforderungen entsprechen und dürfen sich nur sehr wenig durch die produzierten Neutronen aktivieren. Doch selbst mit den fortschrittlichsten Materialien ist es unumgänglich, diese Instabilitäten am Plasmarand zu kontrollieren, indem man entweder ihre Intensität oder ihre Auswirkungen begrenzt.

Die Rolle der Schweiz

Diese Herausforderung der Plasma-Kontrolle wird, als einer der Kernpunkte des R&D zur Kernfusion, auch durch die Schweiz wahrgenommen. Der Tokamak TCV ist weltweit einer der am weitesten perfektionierten Tokamaks zur Entwicklung fortgeschrittener Konzepte zur Magnetfeldstruktur am Plasmarand. Ein aktuelles Beispiel ist die Plasma-Konfiguration «snowflake» («Schneeflocke»), die zum ersten Mal im TCV erzeugt wurde und vielversprechende Eigenschaften zur Kontrolle der Interaktionen von Plasma und Wand besitzt.

Die Verbesserung des Tokamak-Konzeptes und die Optimierung der Betriebsmodi für die Plasmas in ITER sind die Hauptziele solcher Anlagen mittlerer Grösse. Unter den drei Anlagen, die in Europa nebst JET als essenziell für die Erreichung der ersten Etappenziele des «Fahrplans» zur Fusion gelten, findet sich daher auch TCV, zusammen mit der deutschen Maschine «ASDEX Upgrade» und «MAST-U» in England.

Diese international wichtige Rolle erhält TCV sowohl dank seiner Flexibilität hinsichtlich der Konfiguration und Form seines Plasmas, als auch seiner hoch entwickelten Kontrollsysteme, seines etablierten Mikrowellenheizungssystems und einer Reihe von Erweiterungen, wie der Installation eines Neutralteilcheninjektors und der Aufrüstung des Mikrowellenheizungssystems um einige MW.

Die Schweiz ist somit in einer Schlüsselposition im weltweiten Forschungsbereich Kernfusion. Man engagiert sich als Partner von EURATOM in der Konstruktion von ITER und im Forschungsprogramm von JET. Es wird Spitzenforschung betrieben in den Bereichen Plasma-Theorie und Simulation, Supraleitung, zu Grundlagen der Plasmaphysik, und direkt zur Optimierung des Tokamak-Konzeptes mithilfe des nationalen Tokamaks TCV. Parallel zu diesen direkten und indirekten Beiträgen zum ITER-Projekt arbeitet das Schweizer Forschungsprogramm bereits auch auf das letzte Etappenziel hin – den Prototyp-Reaktor «DEMO».

Schlussendlich spielt die Schweiz auch eine europa- und weltweit grundlegende Rolle im Bereich der Bildung und Ausbildung durch die universitäre Zugehörigkeit seines Forschungszentrums SPC zur EPFL, durch das Engagement seiner Forscher in der Lehrtätigkeit und durch das weite Spektrum ihrer wissenschaftlichen Bemühungen, in denen Grundlagenforschung und gezielte Anwendung stets Hand in Hand gehen. Dem Bemühen um eine exzellente Ausbildungssituation wird stets grosse Bedeutung zugemessen, da es sich bei der Fusion durch die schiere Bandbreite und Dauer der weltweiten Forschungsanstrengungen um eine mehrere Generationen umspannende Herausforderung handelt.

Das Swiss Plasma Center (<http://spc.epfl.ch>) empfängt gern Gruppen zur Besichtigung unserer Anlagen und des Tokamaks. Für alle weiteren Informationen hierzu kontaktieren Sie bitte Yves Martin (yves.martin@epfl.ch).