

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 96 (1978)
Heft: 39

Artikel: Die "Meilensteine" auf dem Weg zum Fusionsreaktor: immer bessere Beherrschung des heissen Plasmas / Zuversicht nach erfolgreichen Experimenten in Princeton
Autor: Wolf, Gerd H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73750>

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: 10.07.2025

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

Die «Meilensteine» auf dem Weg zum Fusionsreaktor

Immer bessere Beherrschung des heissen Plasmas / Zuversicht nach erfolgreichen Experimenten in Princeton

Von Gerd H. Wolf, Jülich

Die kontrollierte Kernfusion gehört zu den wenigen Optionen für eine langfristig gesicherte Energieversorgung. Sie soll die bei der Verschmelzung leichter Atomkerne frei werdende Energie, die auch die Sonne und die Fixsterne am Leuchten hält, technisch nutzbar machen. Weltweit werden jährlich schätzungsweise 3 Milliarden Mark für die Fusionsforschung ausgegeben. Diese Anstrengungen haben in den letzten Jahren zu wesentlichen Fortschritten geführt, und zwar auf dem Gebiet der Aufheizung und Einschliessung heisser Plasmen, dem Brennmedium eines zukünftigen Fusionsreaktors.

Um den weiten Weg überschaubar zu machen, hat man einige Zwischenziele («Meilensteine») festgelegt:

1. Demonstration des *physikalischen Prozessablaufs* (scientific feasibility)
2. Demonstration der *technischen Durchführbarkeit* (technical feasibility)
3. Demonstration der *wirtschaftlichen Brauchbarkeit* (economic feasibility).

Die Fusionsforschung steht *knapp vor dem ersten Meilenstein*: die Demonstration des physikalischen Prozessablaufs, das heisst der physikalischen Machbarkeit, wird im Verlauf der achtziger Jahre erwartet. Nach Planungsmodellen könnte der zweite Meilenstein, der Beweis der technischen Realisierbarkeit, bei günstiger Entwicklung innerhalb von 25 Jahren erreichbar sein. Abschätzungen zum dritten Meilenstein sind besonders schwierig, weil sie Annahmen über das energiewirtschaftliche Umfeld im nächsten Jahrhundert und über Ergebnisse weit in der Zukunft liegender Forschungsprogramme benötigen. Ob dieser Weg zum Erfolg führt, ist also noch nicht sichergestellt.

Rückblick

In massgebenden Industrienationen wird seit über 25 Jahren Fusionsforschung betrieben; die in einigen Ländern zunächst vorhandene *Geheimhaltung* wurde 1958 aufgehoben. Ermutigt durch die technischen Erfolge beim Bau von Kernspaltungsreaktoren und bei der Entwicklung der Wasserstoffbombe, begann die Fusionsforschung mit Optimismus. Die anfänglichen Hoffnungen auf rasche Erfolge wurden jedoch nicht erfüllt. Statt dessen folgte eine Phase vielfältiger Rückschläge und eine lange Reihe von Untersuchungen zu verschiedenen Konzepten der Einschliessung und Heizung von Plasmen. Erst allmähliche Fortschritte, unter anderem auch in den Messmethoden und in den Möglichkeiten der theoretischen Plasmabeschreibung, führten dann zu der inzwischen stetig wachsenden Zuversicht, die plasma-physikalischen Vorgänge so weit beherrschen zu können, dass die physikalischen Vorbedingungen für einen Fusionsreaktor erfüllt sind.

Hierbei haben sich zwei Verfahren in zunehmendem Masse aus den anderen hervorgehoben. Eines davon ist die

quasistationäre magnetische Einschliessung von Plasmen in ringförmigen Magnetsystemen, deren prominenteste Vertreter die Apparaturen vom Typ *Tokamak* sind. Das andere Verfahren gilt dem Ziel, kleine Kügelchen des nuklearen Brennstoffgemischs während eines Zeitraums von Milliarden Sekunden in ihrem Kern auf Zündtemperatur zu bringen und so durch eine nukleare Mini-Explosion Energie freizusetzen (*Laser-Fusion* oder *Trägheitseinschluss*). Selbstverständlich lassen sich mit Hilfe dieser Meilensteine nur *Problemschwerpunkte* charakterisieren, die noch in vielfältiger Weise miteinander verknüpft sind. Im folgenden wird nur die magnetische Einschliessung im Tokamak behandelt.

Leistungsbilanz in Tokomaks – molekulares und nukleares Feuer

In einem Tokamak kann man ein heisses Plasma über eine bestimmte Zeitdauer – derzeit typisch etwa 0,5 Sekunden – mit ringförmigen Magnetfeldern einschliessen. Der thermische Energie-Inhalt des Plasmas wird während dieser Zeit mehrfach umgesetzt, so dass von einem «quasistationären» Zustand gesprochen wird. Dieser wird einerseits durch die zugeführte Heizleistung und andererseits durch die erreichte Wärmedämmung bestimmt. Er lässt sich im Hinblick auf seine Leistungsbilanz mit der Flamme in der Brennkammer eines Kohlekraftwerks vergleichen. Will man dort das Brennstoffgemisch entzünden, muss zunächst so lange durch Zusatzaggregate, zum Beispiel Öl- oder Gasbrenner, von aussen Heizleistung zugeführt werden, bis oberhalb einer bestimmten Temperatur die bei der beginnenden Verbrennung frei werdende Leistung ihrerseits ausreicht, um die etwa durch Strahlung, Konvektion oder Wärmeleitung verursachten Wärmeverluste zu kompensieren: das molekulare Feuer hat dann gezündet.

Noch bevor jedoch die so definierte Zündtemperatur erreicht ist, gibt es einen Zustand, bei dem die in der Flamme freigesetzte Leistung gerade so gross geworden ist wie die dem Brennstoffgemisch von aussen zugeführte Heizleistung. Bezogen auf die angestrebte Zündung des thermonuklearen Feuers, bezeichnet man diesen Zustand des quasistationären Leistungsgleichgewichts als «*break-even point*» dieser wird heute allgemein mit der Erreichung des ersten «Meilensteins» gleichgesetzt. Die hierfür erforderliche Plasma-Temperatur und die magnetische Wärmedämmung (charakterisiert durch die sogenannte Energie-Einschliessungszeit) können dabei etwas geringer sein als im Falle der «echten Zündung», bei der die Wärmeverluste durch die im Plasma freigesetzte Energie vollständig kompensiert werden. Die Bedingungen für den «break-even point» sind gegeben, wenn das Produkt aus Einschliesszeit und der Dichte der Brennstoffteilchen etwa 3×10^{33} (sec/cm³) beträgt und die Temperatur von 60 Millionen Grad erreicht wird. Für eine Zündung des Plasmas sind dagegen Werte von etwa 3×10^{11} (sec/cm³) und 120 Millionen Grad erforderlich.

Neue Ergebnisse

Vor einigen Wochen gelang es, durch kurzzeitige (0,1 Sekunden) Injektion von Atomstrahlen dem Plasma im Tokamak PLT in *Princeton* 2 Megawatt zusätzlicher Heizleistung zuzuführen. Die dabei beobachtete Verhundertfachung der Ionen-Temperatur (60 Millionen Grad) war höher als erwartet. Dieses Ergebnis, unterstützt durch Resultate in anderen Tokamaks, ermutigt zu der Annahme, dass mit Hilfe der im Bau befindlichen Grossanlagen wie dem TFTR (*Toroidal Fusion Test Reactor, Princeton*, Betriebsbeginn 1981/82) und JET (*Joint European Torus, Culham*, Betriebsbeginn um 1983) der break-even-point überschritten werden kann. Mit dem JET wird es vielleicht sogar möglich sein, bis nahe an den Zündbereich heranzukommen. Bei nicht zu skeptischer Einschätzung der jüngsten Ergebnisse lässt sich zusammenfassend sagen:

1. Mit Injektoren für den Einschuss hochenergetischer Atomstrahlen hoher Leistung (typisch 1 Megawatt je Injektor) ist eine Technik verfügbar geworden, Tokamak-Plasmen ausreichend Heizleistung zuzuführen. Die für TFTR vorgesehene Heizleistung ist 30 Megawatt; in dieser Grössenordnung liegt damit auch die dort erwartete nukleare Leistung.
2. Die beobachtete magnetische Wärmedämmung der für die nuklearen Reaktionen massgebenden Plasma-Ionen überstieg die theoretischen Erwartungen, da zusätzliche Energieverluste aufgrund vorhergesagter neuartiger Instabilitäten nicht aufgetreten sind. Dementsprechend sollte in den grösseren Apparaturen auch die für «break-even» erforderliche noch bessere Wärmedämmung erreichbar sein.

Diese Schlussfolgerungen gelten unter dem Vorbehalt, dass befriedigende Lösungen zu zwei noch offenen Fragen gefunden werden, über welche erst die im Bau befindlichen Versuchsanlagen Auskunft geben können. Neben JET und TFTR sind es in *Deutschland* zum Beispiel die Anlagen *Asdex* in *Garching* und *Textor* in *Jülich*. Hierbei handelt es sich einerseits um die Aufgabe, den quasistationären Plasmazustand über eine längere Zeitdauer, etwa über einige Sekunden, aufrechtzuerhalten. Dies betrifft unter anderem den Brennstoffkreislauf, die Weiterentwicklung der Injektor-Technik und vor allem das Problem der sogenannten *Plasma-Wand-Wechselwirkung*, also die Frage, in welchem Masse es gelingen wird, eine allmähliche Ansammlung von *Verunreinigungen* zu unterdrücken, die aufgrund von Wechselwirkungsprozessen zwischen dem heissen Plasma und den Gefässwänden erzeugt und eingeschleppt werden können. Denn diese führen zu *Energieverlusten durch Strahlung* und zu einer *Druckerhöhung*. Andererseits geht es um die Frage, ob die bei den nuklearen Fusionsreaktionen entstehenden energiereichen *Alpha-Teilchen* (Helium-Ionen), die das Plasma heizen müssen und deren Energie somit wesentlicher Bestandteil der Leistungsbilanz ist, unerwünschte Nebeneffekte verursachen werden.

Die technischen Aufgaben

Zum Erreichen des ersten Meilensteines muss bereits eine ganze Reihe technischer Probleme zumindest ansatzweise gelöst sein. Bis zur Demonstration der technischen Realisierbarkeit des Fusionsreaktors sind dann noch wichtige andere Aufgaben zu bewältigen. Davon seien fünf genannt:

Plasmatechnik

Dazu gehören alle mit Aufheizung, Teilchen- und Leistungsbilanz, Brennstoffzufuhr und Asche-Abfuhr, mit Stabilität (Lage des Plasmas, Temperatur), mit Plasmadruck, Reinhaltung und Brenndauer zusammenhängenden Fragen. Der Tokamak-Reaktor arbeitet nicht kontinuierlich, sondern im

Impulsbetrieb. Die Pulsdauer ist deshalb von besonderer Bedeutung, weil neben der Zündbedingung auch eine über diese Zeit integrierte Gesamtenergiebilanz befriedigt werden muss. Nach derzeitigen Abschätzungen liegt die erforderliche Pulsdauer in einem Tokamak-Reaktor bei etwa 100 Sekunden.

Zusatzaggregate

Die zweite wichtige Frage betrifft die *Zusatzaggregate*: Geräte zur Plasmaheizung, Brennstoffnachfüllung und Abfuhr von Teilchen und Energie müssen (weiter-)entwickelt werden, wobei die veränderten längeren Pulszeiten und ihre Verträglichkeit mit einzelnen Reaktorkomponenten und mit der vom Plasma emittierten Strahlung zu berücksichtigen sind.

Magnettechnik

Besondere Bedeutung kommt auch der *Magnettechnik* zu. Wegen der langen Pulszeiten gilt es als sicher, dass die benötigten hohen Magnetfelder (im Mittel etwa 50 Kilogauss) ökonomisch nur mit *supraleitenden Spulen* erzeugt werden können. Diese Spulen sind grossen magnetischen Kräften ausgesetzt. Die Entwicklung solcher Magnete ist eine langfristige Aufgabe. Deutschland ist mit Arbeitsgruppen in *Karlsruhe* und *Garching* an einem internationalen Projekt zum Test grosser supraleitenden Magnetspulen in *Oak Ridge* beteiligt.

Tritiumtechnik

Eine weitere Aufgabe ist die Entwicklung der *Tritiumtechnik*. Tritium, ein radioaktives Wasserstoffisotop, ist Bestandteil des Brennstoffgemisches. Es kommt in der Natur praktisch nicht vor und muss durch Kernreaktionen zwischen den bei den Fusionsprozessen entstehenden Neutronen und Lithium in speziellen Kammern, dem Blanket, erbrütet werden. Der Umgang mit grösseren Mengen Tritium, seine Erzeugung, Abtrennung, Speicherung und Rückhaltung muss vor Inbetriebnahme eines Demonstrationsreaktors befriedigend beherrscht werden.

Materialtechnik

Auch die wichtige Frage der *Materialtechnik* bedarf noch intensiver Forschungsarbeiten. Die der Plasmastrahlung ausgesetzten Materialien der inneren Gefässstruktur sind vielfältigen Beanspruchungen unterworfen. Die Neutronen, die bei der Verschmelzung frei werden, können die mechanischen Eigenschaften, zum Beispiel die Zähigkeit, beeinträchtigen. Wegen der induzierten Radioaktivität würde man gern Materialien auswählen, deren Strahlung rasch abklingt. Aspekte der Plasma-Wand-Wechselwirkung oder der Tritium-Rückhaltung führen wiederum zu anderen Auswahlkriterien. Umfangreiche Untersuchungen sind erforderlich, um geeignete Materialien oder Materialkombinationen für die Struktur des inneren Gefässes eines Reaktors bereitzustellen.

Eine zentrale Aufgabe der künftigen Arbeiten liegt ausserdem darin, das Gesamtsystem «*Demonstrationsreaktor*» zu definieren. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist die Frage der Reparierbarkeit, zum Beispiel durch Fernbedienung und geeignete Modul-Bauweise. Die Vorstellungen von einem Demonstrationsreaktor bestimmen auch die Definition nötiger Zwischenschritte, die im westeuropäischen Jargon als «Post-JET» bezeichnet werden. Definition, Konstruktion und Bau einer (oder mehrerer) Post-JET-Anlagen erstrecken sich vermutlich über 10 bis 15 Jahre, so dass mit ersten Ansätzen hierzu bald begonnen werden muss, falls bei Vorliegen der wesentlichen Ergebnisse von TFTR und JET

baureife und genehmigte Konstruktionsunterlagen vorliegen sollen.

Internationale Zusammenarbeit

Aufwand und Umfang dieses Forschungsprogramms übersteigen die Möglichkeiten und Bereitschaft einzelner Staaten, alle Probleme selbst zu bearbeiten. Dementsprechend haben sich vielerlei Formen der *internationalen Zusammenarbeit* entwickelt. In Westeuropa wird das Forschungsprogramm durch *Euratom* koordiniert und gelenkt; die *Internationale Atomenergiebehörde* in Wien (IAEO) sorgt für weltweiten *Informationsaustausch*. Über die *Internationale Energieagentur* (IEA/OECD) in Paris bestehen detaillierte Zusammenarbeitsverträge zwischen *Euratom*, *Japan*, *Schweiz*, *USA* und weiteren Partnerländern (derzeit Large Coil Project, Oak Ridge, und TEXTOR, Jülich; weitere gemeinsame Projekte sind in Planung).

Ausserdem hat die IAEO in Wien vor etwa einem Jahr die Anregung zu einer noch intensiveren weltweiten Zusammenarbeit unterbreitet. Das konkrete Ergebnis dieser Aktivität ist die Absicht, in Wien einen Arbeitskreis ins Leben zu rufen, in dem *Euratom*, *Japan*, die *Sowjetunion* und die *Vereinigten Staaten* vertreten sein sollen. Gestützt auf die Expertengruppen der einzelnen Partnerländer, soll dieses Gremium Studien zur Definition einer *Nachfolgeapparatur* zu den Anlagen der Generation JET, JT-60 (Japan) und TFTR

ausarbeiten. Eine erste Zusammenkunft der Vertreter der einzelnen Delegationen wird voraussichtlich noch in diesem Jahr stattfinden; der Arbeitskreis soll seine erste Sitzungsperiode Anfang nächsten Jahres beginnen. Diese Aktivitäten werden für die weiteren Programmplanungen sicher sehr befruchtend sein; Voraussagen, ob daraus gar ein internationales Grosseperiment erwachsen könnte, wären derzeit jedoch verfrüht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die weltweiten Forschungsarbeiten zur kontrollierten Kernfusion auf dem Gebiet der quasistationären magnetischen Einschlussung die Demonstration der physikalischen Machbarkeit in fast greifbare Nähe gerückt haben und dass die weiterführende Programmgestaltung bereits deutlich in Richtung auf den nächsten Meilenstein ausgerichtet wird, nämlich auf die Demonstration der technischen Realisierbarkeit. Nach den Studien verschiedener Planungsgruppen könnte dieses Ziel bei günstiger Entwicklung innerhalb der nächsten 25 Jahre erreichbar sein.

(Wenig veränderter Nachdruck aus der «Frankfurter Allgemeinen Zeitung», Beilage «Natur und Wissenschaft» vom 13. Sept. 1978. Seiten 29/30. Mit freundlicher Genehmigung der FAZ-Redaktion und des Verfassers.)

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. G.H. Wolf, Institut für Plasma-physik, Kernforschungsanlage Jülich (GmbH), D-5170 Jülich.

JET: Europas Beitrag zur Kernfusionsforschung

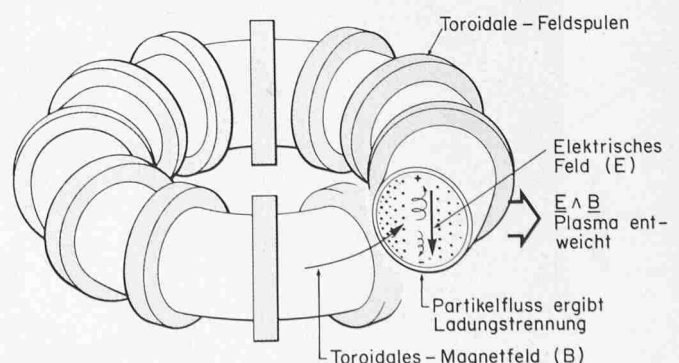
Von Eric Ford*

Die Erzeugung von Energie durch die Fusion leichter Atomkerne stellt eine enorme Energiequelle für die Zukunft dar, eine Quelle, die grössere Energiemengen liefert, als sie irgend woher gewonnen werden könnten. Experimente zur Erforschung möglicher Methoden zur Freilegung dieser Fusionsenergie gibt es seit etwa fünfundzwanzig Jahren in vielen Ländern, und zurzeit werden Anlagen konstruiert, die annähernd so gross sind, wie sie in einem zukünftigen Reaktor gebraucht werden. Immerhin müssen kontrollierte experimentelle Bedingungen für die Freisetzung umfangreicher Mengen von Fusionsenergie erst noch bewiesen und immense technische Probleme bewältigt werden, bevor ein wirtschaftliches Reaktorsystem konstruiert werden kann.

Aufgrund von Beschlüssen, die im Oktober 1977 gefasst wurden, wird der Gemeinsame Europäische Torus (*Joint European Torus*: JET) auf einem an das *Culham Laboratory* angrenzenden Grundstück der *Atomenergiebehörde des Vereinten Britischen Königreichs* (UKAEA) gebaut, der grösste Einzelposten im Fünfjahres-Fusionsprogramm (1976–1980) der Europäischen Gemeinschaft.

Bevor man die Zielsetzungen und das Programm des JET-Projektes betrachtet, muss man es im Zusammenhang mit dem

Gesamtp Problem nuklearer Fusion sehen. Die Energieerzeugung durch Kernfusion von leichten Elementen erfordert das Zusammenbringen heisser Mischungen der Wasserstoff-Isotope Deuterium und Tritium während einer genügend langen Zeitspanne, damit sich eine genügend grosse Anzahl von Reaktions-Kollisionen zwischen den Atomkernen ereignen können. Bei den sehr hohen Temperaturen, die dazu notwendig sind, besteht die Materie als ein *flüssiger Körper aus Elektronen und*



Einfaches Toroid-Magnetfeld, gebildet durch die geschlossenen Feldlinien, die durch einen Satz Spulen auf einem Torus erzeugt werden. Das System kapselt das Plasma nicht ein

*) Dieser Text basiert auf dem Artikel «The JET Project» von A. Gibson, Vizechef (Physik) des JET Konstruktions-Teams. Der Beitrag wurde in «Atom», dem Monatsheft der Atomenergiebehörde des Vereinten Britischen Königreichs, Nummer 254, S. 326–338, 1977 veröffentlicht.