

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 98 (1980)  
**Heft:** 33-34

**Artikel:** Fusionsmaschine zeigt erstmals Reaktoreignung  
**Autor:** Breuer, Reinhard  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-74167>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.03.2025

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

Weiss bleibt zu kalt,  
schwarz wird zu heiss.

Der dunklere Farbton lässt auch die Eisbildung (infolge Umwandlung von Licht in Wärme) später eintreten. Dies hat möglicherweise das Ausbleiben von Schäden aus dem Tausalz-Temperaturschock zur Folge.

Der Farbton wird meist nach dem optischen Aussehen gewählt. Die praktische Wirkung der Helligkeit ist aber weitere Prüfungen wert.

#### Wichtige Massnahmen

**Unterhalt.** Eine rissüberbrückende Beschichtung muss elastisch sein. Sie ist aber durch mechanische Einwirkungen verletzlich, insbesondere durch Maschinen des Strassenunterhaltes (Schneepflug, usw)! Jede verletzte Beschich-

tung muss im Frühjahr durch den Strassenunterhaltungsdienst repariert werden!

**Konstruktive Massnahmen.** Die Leitplanken können über den Brückenrand nach innen vorstehen und so eine mechanische Verletzung durch Schneepflug und Pannenfahrzeuge praktisch vermeiden (Bild 17).

Die Brückenabdichtung wird bis über den Rand des Brückenbetons druchgezogen. Der Randbeton wird als «Verschleisssteil» auf die Brücke aufgesetzt und dort befestigt (Bild 18).

#### Schlussbemerkung

*Das Problem Brückenabdichtung-Fahrbelag scheint praktisch gelöst zu sein. Für die gründliche Lösung der Probleme an den Brückenrändern sind noch Forschungen notwendig. Sie sind von öffentlichem Interesse und sollten auch von der «öffentlichen Hand» finanziert*

werden. Beschichtungen mit unterschiedlichem Erhaltungsgrad, bei gleichem Aufbau, bis zu sieben Jahren überwintert, stehen für die Beurteilung zur Verfügung. Die Abhängigkeit von der Betonqualität scheint eindeutig gegeben.

#### Literaturhinweise

Einige Forschungs- und Prüfberichte sind im Abschnitt «Forschung und Prüfergebnisse» genannt worden. Ferner sei auf den Aufsatz «Frost-Tausalz-Einwirkungen auf Beton» von B. Harnik verwiesen, erschienen in der SIA-Dokumentation 23. (1977).

Adresse des Verfassers: F. Kilcher, Ing. SIA, Wengisteinstrasse 9a, 4500 Solothurn.

## Fusionsmaschine zeigt erstmals Reaktoreignung

Einer Forschungsgruppe des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP) in Garching bei München ist möglicherweise ein Durchbruch geglückt, eines Tages auf dem Wege der Kernfusion Energie zu erzeugen – und zwar mit einem zu bisherigen Modellen alternativen Maschinentyp. Damit scheinen sich die Hoffnungen zu verstärken, einmal den Prozess, wie er im Sonneninneren stattfindet, auch auf der Erde in einem kontinuierlich laufenden Reaktor nachzuahmen. Mit einer Fusionsmaschine der sogenannten Stellaratorfamilie, an dem jetzt der Experimentiererfolg erzielt wurde, lässt sich nämlich ein heisses Plasma kontinuierlich einschliessen. Damit wäre dann im Reaktor auch eine kontinuierliche Energiegewinnung möglich – im Gegensatz zu den Reaktoren des bisher an der Spitze der Erwartung stehenden Tokamaktyps, mit dem aber prinzipiell nur ein weniger effektiver gepulster Betrieb möglich ist. Der Stellarator, der am IPP entwickelt wurde, ist die verbesserte Version einer Reaktorlinie, die bereits in den 50er Jahren in Princeton (USA) begonnen wurde.

Das grundlegende Prinzip ist bei Tokamak und Stellarator identisch: in einem ringförmigen Gefäss – Durchmesser etwa 2 Meter – werden durch ein Magnetfeld die Atomkerne und Elektronen eines Plasmas zusammengehalten. Damit es zur Energie spendenden Kernreaktion kommt, müssen die Atomkerne von Deuterium und Tritium, den schweren Isotopen des Wasserstoffs, unter hohem Druck und grosser Temperatur solange zusammengepresst werden, bis die einzelnen Kerne miteinander verschmelzen. Dabei wird, ähnlich wie im Zentrum der Sonne, die Fusionsenergie freigesetzt.

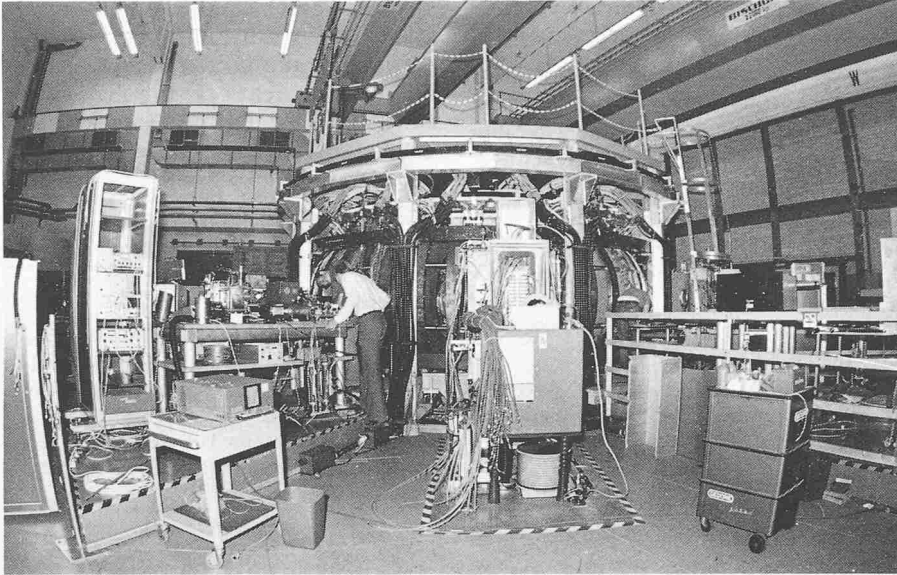
Die Rolle der Magnetfelder ist es, die heissen und schnellen Teilchen des Plasmas von der Wand des Reaktionsgefässes fernzuhalten. Sonst hätte das zur Folge, dass kalte Atome aus der Gefässwand herausgeschlagen werden, in das Plasma eindringen und die Fusionsprozesse unterbrechen.

Dieses Problem der *Einschliessung des Plasmas* wird bei Tokamak und Stellarator unterschiedlich gelöst. Am Stellarator wird durch geschickte Anordnung von Spulen um das Ringgefäss ein Magnetfeld «gewickelt». Bei den frühen Experimenten am Princeton Stellarator drangen jedoch trotzdem so viele Teilchen an die Wand – ein Effekt, der sich bei höheren Temperaturen und grösseren Maschinen verstärken sollte –, dass 1969 diese Entwicklung in den USA praktisch eingestellt wurde zugunsten der Tokamaklinie.

Trotz dieser negativen Erfahrungen liess sich das IPP nicht von der Weiterentwicklung des Stellaratorstyps abschrecken. Eigene Versuche in allerdings noch kleinen Apparaturen mit kalten Plasmen hatten nämlich schon das Funktionieren des Stellaratorprinzips gezeigt – wenn auch nur in diesem simplen «Wendelstein II-A» genannten Prototyp.

Bei den zuerst in der Sowjetunion gebauten Fusionsreaktoren vom Typ Tokamak wird der Plasmaeinschluss anders gelöst: Zusätzlich zu Magnetfeldspulen um den Gefässring wird ein Magnetfeld um das Plasma erzeugt durch einen elektrischen Strom, der im Plasma selbst fliesst. Der elektrische Strom wird durch einen Transformator in das Plasma eingebracht. Durch die kombinierte Wirkung beider Magnetfelder konnte das Plasma in einem dünnen Ring entlang der Achse des Ringgefässes zusammengehalten werden.

Nachteil dieser Anordnung: Dieser Strom muss durch den Transformator aufrechterhalten werden, der aber nur eine endliche Speicherkapazität hat; daher muss der Reaktor – zum Neuaufladen des Transformators – immer wieder neu angefahren werden. Ein anderes Problem beim Tokamak sind die durch diesen Strom im Plasma erzeugten «Instabilitäten». Durch verschiedene Prozesse im Plasma kann der Entladungsvorgang durch eine sich rasch aufbauende «Strominstabilität» ruckartig gestoppt werden. Zum Glück gelang es, in grösseren Tokamak diese Instabilitäten etwas zu bändigen. Ein späterer Reaktor mit Pulsbetrieb wird jedoch immer von Nachteil sein, denn er «ähneln einem Kohlekraftwerk, bei dem man alle zwei Stunden die Anlage abschalten und die Asche herauskratzen müsste», so ein beteiligter Physiker. Diesen Schwierigkeiten versucht man in Garching durch ein modifiziertes Stellaratorprinzip aus dem Weg zu gehen mit dem Ziel eines Prototyps, der kontinuierlich betrieben werden kann. Die weiter unter dem Namen «Wendelstein» laufende Serie sucht die Vorteile



Im Fusionsexperiment «Wendelstein VII-A» aus der Familie der Stellaratoren wird das Plasma fast ausschliesslich durch ein von aussen um das Ringgefäss «gewickelt» Magnetfeld zusammengepresst. Das Plasma wird dabei für Bruchteile von Sekunden auf 10 Millionen Grad erhitzt. Im Vordergrund (Mitte) ist die neuartige «Neutralteilchen-Heizung» zu sehen, mit der – nach Abschalten der Anfangsheizung – die Plasmaentladung aufrechterhalten wird

der konkurrierenden Geräte zu vereinen, ohne sich dafür den Nachteil der Abbruchinstabilitäten einzuhandeln.

Im Typ «Wendelstein VII-A» – einem grösseren Nachfolger des ersten Prototyps –, der unter der Projektleitung von Günter Grieger betrieben wird, wird das Tokamakprinzip lediglich zum «Anheizen» des Gerätes benutzt: Ein Transformator baut das Plasma auf und heizt es in seiner Anfangsphase. Danach übernimmt eine andere Heizung die «Fütterung» des energiehungrigen Plasmas: die sogenannte *Neutralinjektion*. Mit dieser auch bereits bei neueren Tokamaks verwendeten Methode wird ständig ein Strahl elektrisch neutraler (nichtgeladener) Teilchen ins Plasma gelenkt. Die neutralen Teilchen können tief ins Plasma eindringen. Die Bewegungsenergie der Neutralteilchen wird

dabei teilweise vom Plasma absorbiert, heizt es auf und füllt auch Gasverluste wieder auf. Der stromlose Betrieb bringt noch den wichtigen Vorteil, dass die verschiedenen, beim Tokamak auftretenden Strominstabilitäten, durch das von aussen starr angelegte Magnetfeld, gar nicht auftreten können. Bisher war es jedoch noch an keinem anderen vergleichbaren Stellaratorotyp möglich gewesen, in dieser Phase den Transformatorstrom, der die Anfangsheizung besorgt, wieder herunterzufahren oder gar völlig abzuschalten.

Beim Stellarator Wendelstein VII-A ist dies seit kurzem *fast vollständig* möglich. Zur Aufheizung wird im zunächst noch kühlen Plasma ein Strom von 18000 Ampere erzeugt. Sobald die weitere Heizung durch die neutralen Teilchen einsetzt, kann dieser Strom fast auf Null heruntergeregelt werden.

Gleichzeitig steigt die Teilchendichte im Reaktionsgefäss (auf  $10^{14}$  Teilchen im Kubikzentimeter), und die Temperatur erreicht gegenwärtig Spitzenwerte bis zu zehn Millionen Grad.

Trotzdem bleibt das Plasma während der ganzen bisher getesteten Entladungszeit relativ sauber: Es dringen kaum Schmutzteilchen ins Plasmainnere – gegenwärtig beschränkt nur die Kapazität der Neutralteilchenheizung die Entladungszeit nach oben.

Wie Günter Grieger sagt, «ist damit endlich demonstriert worden, dass auch mit äusseren Magnetfeldern allein Plasmen dauerhaft eingeschlossen werden können, und das bei einem Druck, der bis an die theoretisch vorberechnete Grenze geht». Dieser Erfolg gelang den Münchner Plasmaphysikern vor allem durch eine verbesserte, kompliziertere Anordnung des äusseren Magnetfeldes. Der Forschungsdirektor des Plasmaphysik-Laboratoriums in Princeton, Harold P. Furth, ist in seiner Beurteilung des Wendelstein-Ergebnisses noch deutlicher: «Die deutsche Konstruktion (von Wendelstein VII-A) ist in der Fusionsenergie die bedeutendste Entwicklung der letzten zehn Jahre.»

In der Tat hat der erfolgreiche «stromfreie» Einschluss des sonst schwer zu zähmenden Plasmas der ganzen Stellaratorfamilie einen unverhofften Schub an Optimismus gegeben. Die Vorteile eines stationären, also kontinuierlichen Betriebs sind zwingend in Hinblick auf einen einmal voll arbeitenden Fusionsreaktor. «Mit dem Stellarator Wendelstein VII-A», so kommentiert der Leiter des Experimentes Wendelstein Hermann Renner, «konnte erstmals das Potential einer zum Tokamakprinzip alternativen Linie», die zu einem Fusionsreaktor führen könnte, «überzeugend aufgezeigt werden.»

Reinhard Bruer

## Rhythmische Struktur des Schlafes

Rund ein Drittel seines Lebens «verschläft» der Mensch. Doch bis heute kann niemand sagen, warum er das tut: Man weiss nicht, wie oder wodurch Schlaf ausgelöst wird, noch hat man klare Vorstellungen von seinem Sinn, von seinen biologischen Funktionen. Dagegen ist recht gut bekannt, wie der Mensch schläft – und dass sich hinter dem scheinbar gleichförmigen Ruhezustand verschiedene *Schlafstypen* und *Schlafphasen* verbergen, die sich während einer Nacht mehrmals ablösen und zyklisch wiederholen. Solche «Schlafmuster» untersuchen Wissenschaftler der *Max-Planck-Institute für Psychiatrie in München* und für *Verhaltensphysiologie in Erling bei Andechs*. Dabei geht es darum, Einblick in den Ablauf und in die Steuerung des Schlafes zu erhalten. Auch will man Schlafstörungen, wie sie etwa bei Pa-

tienten mit Depressionen auftreten, auf den Grund gehen und Wege zu ihrer Behandlung erschliessen.

Grundlage und zugleich wichtigste Hilfsmittel der modernen Schlafforschung sind *elektrophysiologische Messverfahren*. Sie gestatten, verschiedene physiologische Grössen während des Schlafes fortlaufend zu erfassen, ohne den Schläfer zu stören: Über Elektroden werden von der Haut *bioelektrische Potentiale* abgeleitet, *schwache Spannungen*, die je nach Lage der Elektroden Aufschluss über die *Aktivität des Gehirns*, über die *Herzarbeit*, die *Augenbewegungen* oder den *Spannungszustand bestimmter Muskeln* liefern. «Diese Methoden», berichtet Hartmut Schulz vom Max-Planck-Institut für Psychiatrie, «wurden erst gegen Ende der dreissiger Jahre in die Schlafforschung einge-

führt. Bis dahin war es unmöglich, Näheres über den Schlafverlauf zu erfahren, ohne zugleich den Schläfer empfindlich zu stören. Entsprechend einfach war das klassische Konzept des Schlafes: Man sah darin einen rein passiven Ruhezustand, der zwar – wie man aus Weckreiz-Versuchen wusste – in seiner Tiefe veränderlich, ansonsten aber völlig ungegliedert und einheitlich sein sollte.

Dass hinter dem Schlaf mehr steckt, zeigte sich 1937, als man erstmals die *Hirnstromkurven* – das sogenannte *Elektro-Enzephalogramm* (kurz EEG) – von Schlafenden über längere Zeit aufzeichnete. Anhand dieser Kurven konnte man klar *zwei verschiedene Schlafstadien* trennen: das eine kenntlich an *langsamen und hohen Wellen* im EEG, das andere an *schnellen, also hochfrequenten Wellen mit kleiner Amplitude*.